



新型经济型矿用链钢力学与腐蚀性能分析

杨纯田, 翟蛟龙, 孔祥伟, 高 磊, 尹 青, 吴小林
(江阴兴澄特种钢铁有限公司棒线材研究所, 江阴 214400)

摘 要:常用的矿用链钢 23MnNiMoCr54 含有较高的 Ni、Mo 等贵重元素,因而成本较高,限制了广泛应用。本研究通过降低 Ni、Mo 含量和调控 Mn、Cr 含量及添加 Nb 微合金化,设计了一种新型经济性矿用链钢。通过力学性能测试、淬透性试验、均匀腐蚀及应力腐蚀试验,结合链条性能测试,对比分析了新型钢与 23MnNiMoCr54 钢的性能差异。结果表明,新型钢力学性能及淬透性均满足标准的要求;在模拟矿井水中,其均匀腐蚀速率与对照钢无显著差异,应力腐蚀敏感因子及氢脆系数表现更优,抗氢致开裂性能提升;新型钢制成的链条破断负荷达 1 710 kN,疲劳寿命超 6.7×10^4 次,符合 GB/T 12718—2009 中 C 级链标准。

关键词:矿用链; 腐蚀; 氢致开裂; 力学性能; 低成本

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2025-00157 **中图分类号:**TG142. 1

Mechanical Properties and Corrosion Resistance of a Novel Economic Mining Chain Steel

Yang Chuntian, Zhai Jiaolong, Kong Xiangwei, Gao Lei, Yin Qing, Wu Xiaolin
(Rod and Wire Research Institute of Jiangyin Xing Cheng Special Steel Co., Ltd., Jiangyin 214400, China)

Abstract: At present the commonly used mining chain steel 23MnNiMoCr54 contains high valuable elements such as Ni and Mo, so the cost is high, which limits its wide application. In this study, a new type of economical mining chain steel was designed by reducing the contents of Ni and Mo, regulating the contents of Mn and Cr, and adding Nb microalloying. Through mechanical property tests, hardenability tests, uniform corrosion and stress corrosion experiments, combined with chain performance tests, the performance differences between the new steel and 23MnNiMoCr54 steel were compared and analyzed. The results show that the mechanical properties and hardenability indexes of the new steel meet the standard requirements. In simulated mine water, its uniform corrosion rate has no significant difference from that of the control steel, while the stress corrosion sensitivity factor and hydrogen embrittlement coefficient are better, and the hydrogen-induced cracking resistance is improved. The chain made of the new steel has a breaking load of 1 710 kN and a fatigue life of more than 6.7×10^4 cycles, meeting the C-level chain standard in GB/T 12718-2009.

Key Words: Mining Chain; Corrosion; Hydrogen Induced Cracking; Mechanical Properties; Low Cost

矿用链条作为煤矿刮板输送机、刨煤机等关键设备的核心承力部件,长期服役于井下高湿度、多粉尘、富含离子及微量 H_2S 、 CO_2 气体的复杂腐蚀环境,同时,承受交变拉伸应力、弯曲应力及磨损载荷的耦合作用^[1-2]。这种严苛工况对链条原材料提出了多重性能要求。矿用链条需要具备高强度、高韧性、抗疲劳、耐腐蚀等综合性能,任何性能的不足都可能导致突发断裂事故,引发重大安全隐患和经济损失^[3]。

目前,23MnNiMoCr54 钢是矿用链钢的主流材料,其含 $w[Ni]0.9\% \sim 1.1\%$ 和 $w[Mo]0.5\% \sim 0.6\%$,通过固溶强化和钝化膜优化,具备优异的强韧性匹配和抗腐蚀性能^[4-5]。然而,镍和钼作为战略资源,

价格波动大,导致该钢材生产成本高,限制了其中低端矿用设备中的广泛应用。适当降低贵重合金含量是降低成本的有效方法,但面临性能下降的难题,Nb 微合金化技术为解决这一矛盾提供了新路径。Nb 原子半径大(0.147 nm),易与 C、N 结合形成高熔点的 Nb(C,N)析出相,在钢中发挥晶粒细化和析出强化作用^[6],细化晶粒能通过提高晶界面积从而提高裂纹扩展的阻力,提高材料的抗应力腐蚀开裂(Stress Corrosion Cracking, SCC)和氢致开裂(Hydrogen Induced Cracking, HIC)性能^[7]。同时,Nb 的碳(氮)化物作为不可逆氢陷阱,能有效降低钢中可扩散氢的浓度,进而降低氢脆敏感性,减少 HIC 的风险^[8-10]。

作者简介: 杨纯田(1992—),男,博士,工程师; **E-mail:** yct826@163.com; **收稿日期:** 2025-06-27

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

基于此,本研究在 23MnNiMoCr54 钢成分体系中,将 Ni、Mo 含量降低,适当提高 Mn、Cr 含量,同时,添加一定的 Nb 进行微合金化,设计新型经济型矿用链钢。通过系统研究其力学性能、均匀腐蚀行为、应力腐蚀敏感性及链条服役性能,验证合金优化对贵重元素减量后钢种性能的补偿效应,为低成本矿用链钢的工程应用提供理论与试验支撑。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验用新型矿用链钢由某钢厂制造,主要的工艺流程包括转炉(100 t)→精炼(100 t)→连铸(坯料断面规格 240 mm×240 mm)→加热→轧制→退火→热处理。轧制成品的规格为 $\phi 34$ mm 棒材。选用的对照钢种 23MnNiMoCr54 钢制造流程与新型矿用链钢相同。试验所用钢种的化学成分见表 1。矿用链钢的性能测试在调质处理后进行,新型矿用链钢与对照钢种的调质工艺分别为:890 °C 保温 40 min-水冷+470 °C 保温 1.5 h-水冷(新型矿用链钢)和 890 °C 保温 40 min-水冷+450 °C 保温 1.5 h-水冷(23Mn-NiMoCr54 钢)。

1.2 试验方法

1.2.1 晶粒度评价

依据 GB/T 6394—2017 通过氧化法显示两种钢原奥氏体晶粒度,取热轧棒材样品,将试样一面抛光置于炉中(890±10)°C 加热,保温 1 h,冷水中淬火,抛光后使用 15% 盐酸乙醇溶液浸蚀。使用比较法评价两种钢的晶粒度。

1.2.2 力学性能测试

沿轧制方向截取拉伸试样和冲击试样,依据 GB/T 228.1—2021 和 GB/T 229—2020 测试室温拉伸性能(屈服强度、抗拉强度、断后伸长率、断面收缩率)和冲击吸收能量。

1.2.3 淬透性测试

标准试样尺寸为 $\phi 25$ mm×100 mm,试样应无缺陷,表面粗糙度不大于 1.6 μ m,试样先进行正火处理。再加热至规定温度后保温一定时间,取出试样迅速置于端淬试验装置上,使试样下端面与喷水口

保持规定距离,调节水压使水柱自由高度为(65±5)mm,从试样取出到开始喷水的时间不得超过 5 s,喷水时间应大于 10 min。淬火后试样沿轴线方向在相对 180°的两边磨去 0.2~0.5 mm 的深度,获得两相互平行的平面。测量要求位置的硬度值(HRC)。

1.2.4 电化学及挂片腐蚀试验

通过电化学工作站对试验钢进行电化学测试。电化学测试采用三电极体系,将试验钢及对照钢制成工作电极,镶嵌在环氧树脂中,饱和甘汞电极作为参比电极,尺寸为 10 mm×10 mm×0.1 mm 的铂片作为对电极。腐蚀溶液为模拟矿井水,根据实际煤矿水(取样自山西李阳煤矿)的主要成分配置,具体成分如下:NaCl 0.27 g/L, Na₂SO₄ 0.669 g/L, pH 7.7。

制备 20 mm×40 mm×2 mm 的腐蚀试样,上部打孔用于悬挂,表面打磨至 200# 砂纸,经去离子水清洗、干燥后称重。试验所用的腐蚀溶液为模拟矿井水,试样在模拟矿井水中分别腐蚀 144、336 h 后取出,用克拉克溶液去除表面腐蚀产物,称重并计算平均腐蚀速率。

1.2.5 应力腐蚀试验

采用慢应变速率法(SSRT),试样尺寸如图 1 所示,应变速率为 1×10^{-5} s⁻¹。试验分别在干燥空气、模拟矿井水、模拟矿井水加载-800 mV 电位和模拟矿井水加载-1 200 mV 电位条件下进行。参比电极为饱和甘汞电极。模拟矿井水成分与 1.2.4 相同。试验在应力腐蚀试验机上进行,使用扫描电子显微镜观察断口形貌。

1.2.6 链条性能测试

将试验钢经编环、焊接加工成 $\phi 34$ mm×126 mm 矿用圆环链,经调质热处理后,依据 GB/T 12718—2009 标准测试破断负荷、试验负荷下最大伸长率、破断时最小伸长率和疲劳寿命等数据。

2 试验结果与讨论

2.1 奥氏体晶粒度

通过氧化法处理显示原奥氏体晶界,并通过 GB/T 6394—2017 规定的比较法评价新型矿用链钢与 23MnNiMoCr54 钢的奥氏体晶粒度,结果二者分别为 7 级和 6.5 级晶粒度,符合 GB/T 10560—2017

表 1 试验钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of test steels

钢种	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Nb
新型矿用链钢	0.20~0.25	≤0.25	1.20~1.60	≤0.020	≤0.020	0.70~1.30	0.10~0.70	≤0.25	0.20~0.50	0.01~0.05
23MnNiMoCr54	0.20~0.25	≤0.25	1.10~1.40	≤0.020	≤0.020	0.40~0.60	0.90~1.10	≤0.25	0.50~0.60	-

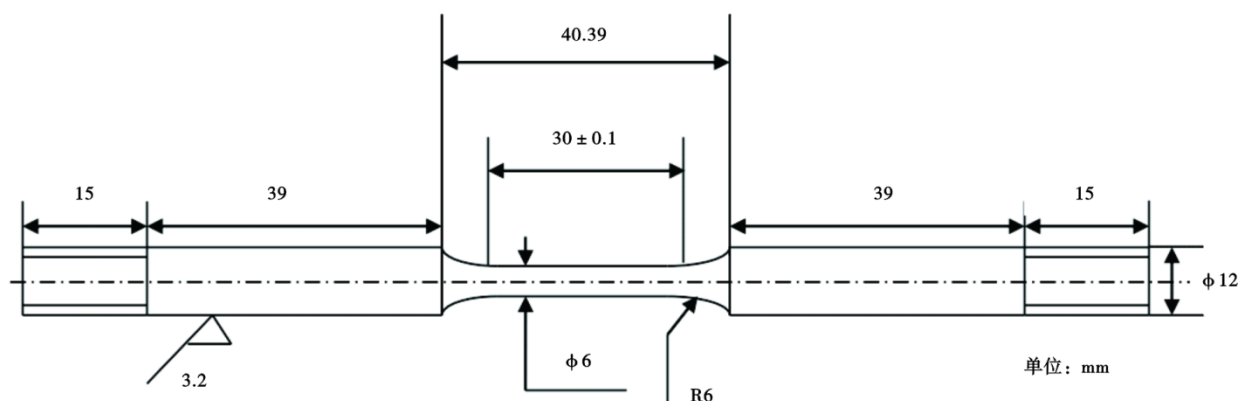


图 1 慢拉伸试样尺寸图

Fig. 1 Dimensional diagram of slow tensile test specimen

中晶粒度不粗于 6 级的要求。与 23MnNiMoCr54 钢相比,新型矿用链钢的晶粒更细,这与 Nb 合金元素的添加有关。

2.2 力学性能

新型矿用链钢与 23MnNiMoCr54 钢经过调质处理后,对力学性能进行检测,检测结果见表 2。新型矿用链钢的屈服强度和抗拉强度分别达到了 1 185、1 259 MPa,均高于 23MnNiMoCr54 钢。新型矿用链钢与 23MnNiMoCr54 的伸长率和断面收缩率接近,伸长率均为 15%,新型矿用链钢断面收缩率 61%,略低于 23MnNiMoCr54 钢的断面收缩率(64%)。新型矿用链钢与 23MnNiMoCr54 的冲击功分别为 96、102 J,表明新型矿用链钢有优异的强韧性匹配,在保证高强度的同时,塑韧性与 23MnNiMoCr54 钢接近。新型矿用链钢在成份上降低了 Ni 和 Mo 的含量,提高了 Mn 和 Cr 含量,通过固溶强化提高钢的强度及淬透性,补偿 Ni、Mo 降低的强度损失,此外增加

Nb 微合金化^[11-12],一方面通过形成细小碳化物钉扎晶界细化晶粒,一方面达到析出强化作用增加强度^[13],保证了新型矿用链钢优异的强韧性表现。新型矿用链钢的回火温度比 23MnNiMoCr54 钢高 20 °C,而保持了更高的强度,具有更强的回火稳定性,这源于 Cr 含量的大幅度提升。

2.3 端部淬透性

通过试验测定新型矿用链钢端部淬透性的结果为 J5=48.6HRC、J9=48.4HRC、J15=47.6HRC,见表

表 2 试验钢力学性能
Table 2 Mechanical properties of test steels

钢种	R_{cl}/MPa	R_m/MPa	伸长率 A/%	断面收 缩率 Z/%	冲击 功/J
标准要求	$\geq 1\ 060$	$\geq 1\ 180$	≥ 10	≥ 50	≥ 60
新型矿用链钢	1 185	1 259	15	61	96
23MnNiMoCr54	1 103	1 199	15	64	102

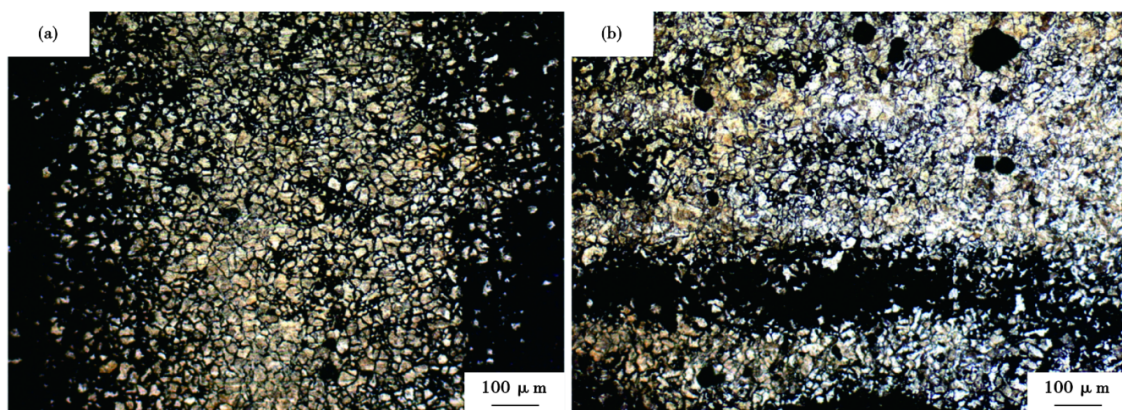


图 2 新型矿用链钢与 23MnNiMoCr54 钢晶粒度金相图:(a)新型矿用链钢,(b)23MnNiMoCr54 钢

Fig. 2 Optical microscope images of new type mining chain steel and 23MnNiMoCr54 steel: (a) new type of mining chain steel, (b) 23MnNiMoCr54

3,符合 GB/T 10560—2017 标准要求。新型矿用链钢与 23MnNiMoCr54 钢相比具有更强的淬透性,这与其更高的 Mn 和 Cr 含量相关。

表 3 试验钢淬透性结果

钢种	J5	J9	J15
标准要求	42 ~ 52	40 ~ 52	37 ~ 51
新型矿用链钢	48.6	48.4	47.6
23MnNiMoCr54	48.5	48	46.5

2.4 均匀腐蚀性能

图 3(a)为试验钢和对照钢在模拟矿井水环境浸泡 1 h 后测得的极化曲线,新型矿用链钢 23MnNiMoCr54 的自腐蚀电位相差不大,分别为 -479 、 -496 mV,两种材料的阳极与阴极曲线近乎重合,测得的腐蚀电流密度分别为 8.9 、 $8.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。两种材料在模拟矿井水环境浸泡 336 h 后,测得的极化曲线如图 3(b)所示。新型矿用链钢与 23MnNiMoCr54 钢的腐蚀电流密度在腐蚀 336 h 后与初始浸泡时相比均有所下降,分别为 2.8 、 $2.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$,说明随着浸泡时间的延长二者腐蚀速率下降,这是因为腐蚀产生的腐蚀产物沉积在表面起到了一定物理屏障的作用降低了腐蚀速率。从电化学结果看,新型矿用链钢腐蚀速率略高于 23MnNiMoCr54 钢但相差不大。新型矿用链钢与 23MnNiMoCr54 钢相比,一方面降低 Ni、Mo 合金含量会对腐蚀产生不利影响,另一方面提高 Cr 合金含量利于提高锈层稳定性从而补偿贵重合金降低的不利作用^[14]。

将新型矿用链钢和 23MnNiMoCr54 钢制成矩形试片,在模拟矿井水中开展挂片腐蚀试验。图 4 为

两种钢材在腐蚀前、腐蚀 144 h 和腐蚀 336 h 后的照片。在腐蚀前两种钢材表现光亮,腐蚀 144 h 后表面出现黑色锈层,腐蚀 336 h 后黑色锈层布满表面。使用克拉克溶液去除表面的腐蚀产物,对试片进行称重,计算两种材料的失重量以及失重速率,结果如图 5 所示。新型矿用链钢和 23MnNiMoCr54 钢在腐蚀 144 h 后的失重量分别为 (0.0167 ± 0.0010) g 和 (0.0172 ± 0.0015) g。腐蚀 336 h 后二者失重量分别为 (0.0393 ± 0.0006) g 和 (0.0398 ± 0.0050) g。结合腐蚀时间和试样面积计算得出失重速率,新型矿用链钢和 23MnNiMoCr54 钢腐蚀 336 h 后平均失重速率分别为 (0.0636 ± 0.0009) g/($\text{m}^2 \cdot \text{h}$) 和 (0.0643 ± 0.0085) g/($\text{m}^2 \cdot \text{h}$)。从挂片腐蚀试验可知,新型矿用链钢和 23MnNiMoCr54 在模拟矿井水中的均匀腐蚀速率并无显著性差异,这与电化学结果一致,说明通过合理调控合金成分,可以使新型矿用链钢在降低成本的条件下达到与 23MnNiMoCr54 钢同样的抗均匀腐蚀性能。

2.5 应力腐蚀性能

矿用链在煤矿服役过程中承受腐蚀和交变应力的双重耦合作用,易发生应力腐蚀而出现断裂失效。因此,矿用链钢应具备良好的抗应力腐蚀性能来保障其使用寿命。为了评估新型矿用链钢的抗应力腐蚀性能,开展了慢拉伸应力腐蚀试验。由图 6(a)(b)可知,无论处于干燥空气、模拟矿井水环境,抑或附加 -850 、 -1200 mV 的阴极电位,新型矿用链钢的慢应变速率拉伸曲线均依次呈现弹性区和塑性区;不同之处在于塑性阶段的演化特征有一定差异。由图 6(c)可知,新型矿用链钢在干燥空气中、模拟矿井水、加载 -850 mV 电位、加载 -1200 mV 电

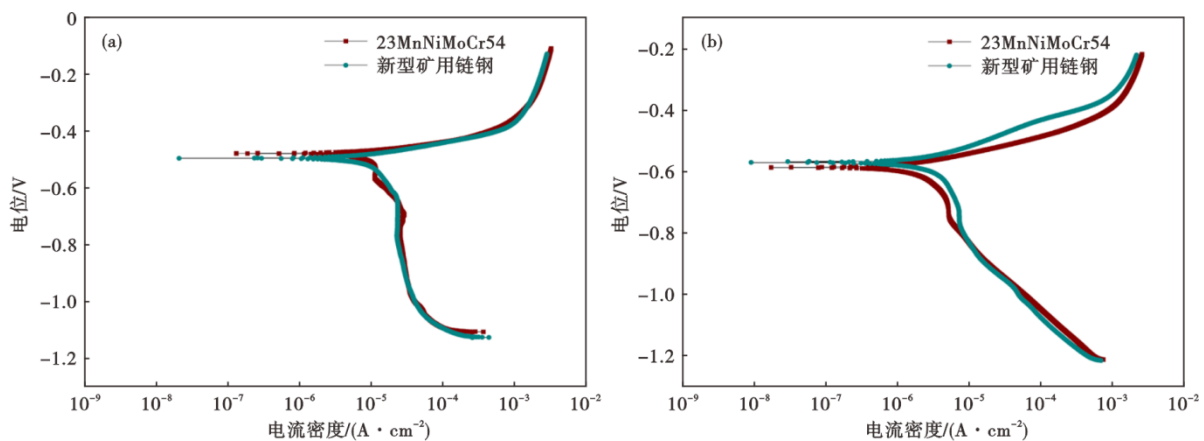


图 3 电化学极化曲线:(a)腐蚀 1 h 后,(b)腐蚀 336 h 后

Fig. 3 Electrochemical polarization curves: (a) after 1 hour of corrosion, (b) after 336 hours of corrosion

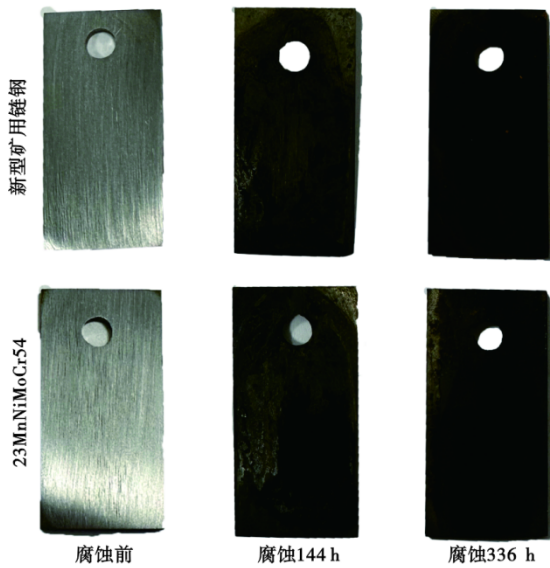


图 4 挂片试样照片

Fig. 4 Photo of corrosion coupons

位条件下慢拉伸的断面收缩率分别为 61.7%、59.8%、59.7%、24.1%。新型矿用链钢在模拟矿井水中不加载电位时断面收缩率与干燥空气相比略微下降,但变化不大,不加载电位时模拟矿井水本身在拉伸时间范围内对钢腐蚀影响不明显。加载电位值从-850 mV 到-1 200 mV 变化时,新型矿用链钢的断面收缩率出现明显下降。23MnNiMoCr54 钢在不同条件下慢拉伸过程中断面收缩率分别为 64.8%、65.2%、60.7%、22.3%,模拟矿井水不加载电位时对 23MnNiMoCr54 钢塑性影响不大,但外加负电位造成了 23MnNiMoCr54 钢断面收缩率的显著下降,尤其是-1 200 mV 电位时。从断面收缩率的下降幅度来看,新型矿用链钢的抗应力腐蚀及氢致开裂性能要优于 23MnNiMoCr54。

依据 GB/T 15970.7—2017《金属和合金的应力腐蚀试验 第 7 部分:慢应变速率试验》开展慢应变速率拉伸试验,可对材料在 SCC 方面的敏感性进行定量评价与判定。试验中引入应力腐蚀敏感因子 I_{SSRT} ,其数值与材料对应力腐蚀的敏感程度呈反比关系,即 I_{SSRT} 越小,材料的 SCC 敏感性越高;该因子通过断面收缩率的相对变化计算获得,如式(1)。

$$I_{SSRT} = \frac{\text{试样在实验环境中得到的结果}}{\text{试样在惰性介质环境得到的结果}} \quad (1)$$

图 7(a) 所示结果表明,两种试验钢的 I_{SSRT} 均随外加负电位的负移而降低。该现象表明,负电位促进了阴极反应的进行,进而诱发 HIC,显著提高了材料的 SCC 敏感性。在未施加电位时,23MnNiMoCr54 钢的 I_{SSRT} 略高于新型矿用链钢;然而,当负电位进一步负移至 -1200 mV 时,前者的 I_{SSRT} 下降幅度明显大于后者,说明新型矿用链钢在极端负电位条件下具有更优异的抗 SCC 性能。

为更精确地评估外加电位对材料氢脆敏感性的影响,引入工程上常用的氢脆系数 I_H ^[15],如式(2)。

$$I_H = (Z_{空} - Z) / Z_{空} \quad (2)$$

式中, $Z_{空}$ 为试样在干燥空气中的断面收缩率/%, Z 为对应试验条件下的断面收缩率/%。依据 I_H 的数值范围,可将材料的氢脆敏感性划分为以下三个区间^[16]:安全区 ($I_H \leq 25\%$)、危险区 ($25\% < I_H < 35\%$) 及脆断区 ($I_H \geq 35\%$)。由图 7(b) 可知,两种材料在模拟矿井水不加载电位和加载 -850 mV 电位条件下 I_H 均小于 7%,均处于安全区,说明即使在 -850 mV 电位条件下,两种材料都保持了良好的抗氢脆能力。而当加载电位达到 -1 200 mV 后, I_H 急剧增加,分别达到了 60.94% (新型矿用链钢) 和 65.58%

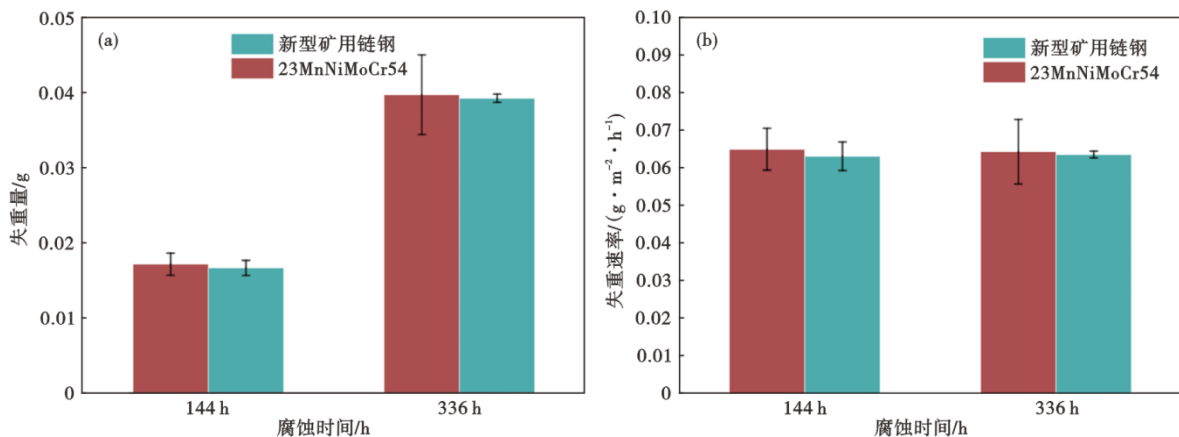


图 5 均匀腐蚀试验失重结果:(a)失重量,(b)失重速率

Fig. 5 Weight loss results of uniform corrosion experiment: (a) weight loss, (b) weight loss rate

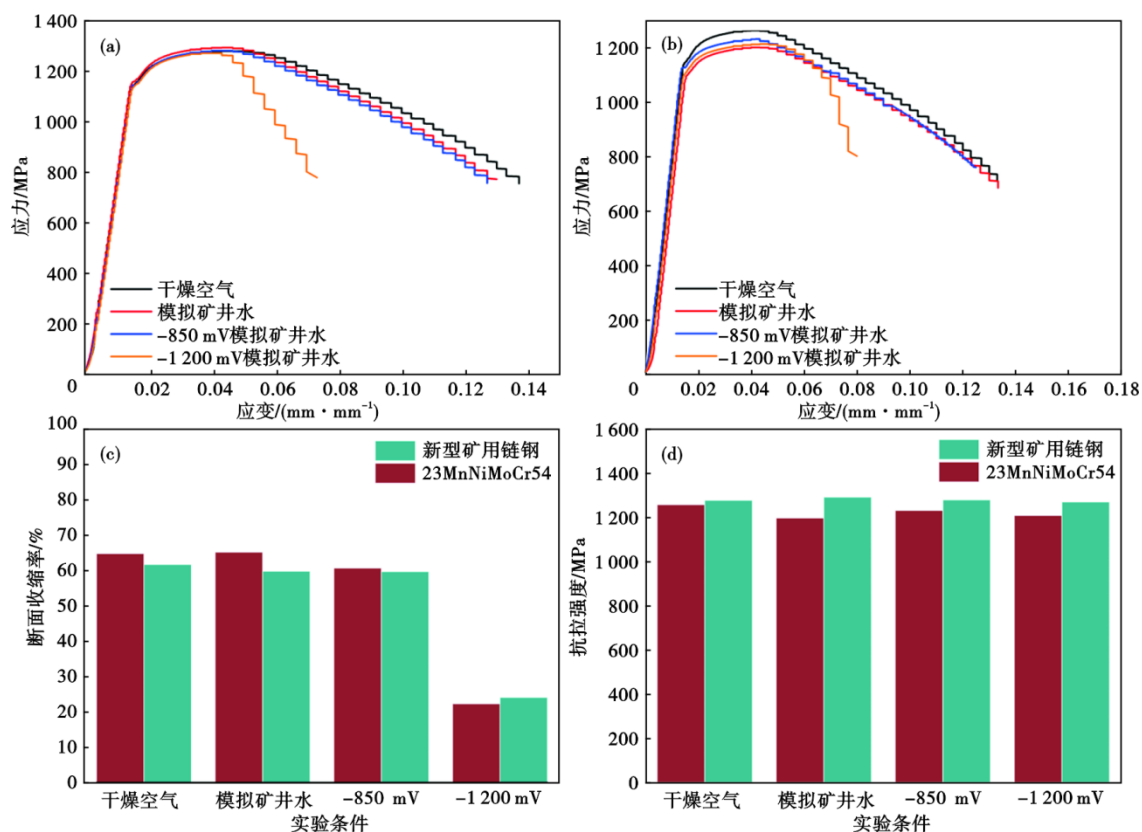


图 6 慢拉伸试验结果:(a)新型矿用链钢拉伸曲线,(b)23MnNiMoCr54 钢拉伸曲线,(c)断面收缩率,(d)抗拉强度
Fig. 6 Slow tensile test results: (a) new type of mining chain steel tensile curve, (b) 23MnNiMoCr54 steel tensile curve, (c) cross-sectional shrinkage rate, (d) tensile strength

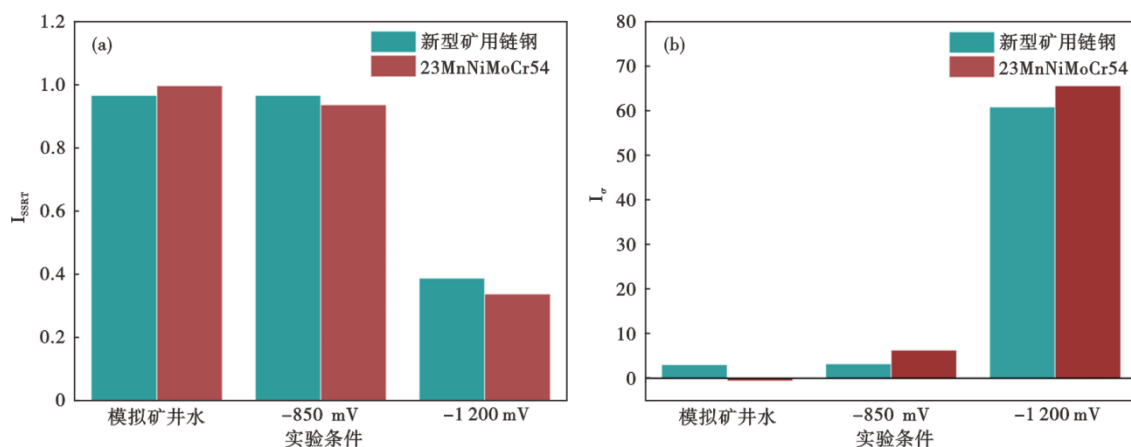


图 7(a) 应力腐蚀敏感因子 I_{SSRT} 和(b)氢脆系数 I_H
Fig. 7 (a) Stress corrosion sensitivity factor I_{SSRT} and (b) hydrogen embrittlement coefficient I_H

(23MnNiMoCr54), 进入脆断区。外加负电位为腐蚀反应提供了额外的电子。当材料表面已形成腐蚀坑或裂纹并在裂纹内部形成闭塞电池时, 裂纹尖端的微阴极区域将发生 H^+ 的还原反应($H^+ + e^- \rightarrow H$)。电位越负, 反应驱动力越大, 裂纹内部富集的氢原子数量随之增加。氢原子扩散进入金属内部后, 逐渐聚合为氢分子, 引发局部高应力集中, 最终

导致氢致开裂的发生。

在 -850、-1 200 mV 的加载电位下新型矿用链钢相比于 23MnNiMoCr54 钢具有更低的氢脆系数, 说明其抗氢致开裂性能更优, 这与 Nb 微合金化的作用相关。Nb 与碳结合力较强, 两者结合生成的碳化物作为不可逆氢陷阱, 能有效降低钢中可扩散氢的浓度, 进而降低氢脆敏感性, 减少氢致开裂的风险。

通常情况下,氢陷阱是作为潜在缺陷存在于钢基体中,在氢陷阱周围会发生氢聚集引起氢压,是氢脆的形成位置^[17]。而不可逆氢陷阱(深氢陷阱)会永久储存氢,不会引起氢压,这些氢可以钉扎钢中的氢原子,抑制氢原子向容易发生裂纹萌生和位置扩散。此外Nb还有细化晶粒的作用,晶粒细化能改善钢的抗氢致裂纹性能,这是因为钢通过细化晶粒处理后,提高了裂纹扩展的阻力^[7]。

图8(a~h)是新型矿用链钢在不同条件下慢拉伸后断口SEM形貌。从断口的低倍扫描图片来看,新型矿用链钢均发生了明显的塑性变形,在干燥空气、模拟矿井水和加载-850 mV电位条件下颈缩程度较大,在加载电位-1 200 mV时,试样的颈缩程度明显小于其他条件,这与面收缩率的结果相一致。由图8(a~f)可知,在干燥空气、模拟矿井水和加载-850 mV电位条件下的断口均表现韧性断裂特征,中心起裂区由高倍扫描图可见韧窝和撕裂棱,扩展区均伴有裂纹,边缘瞬断区较为平坦。由图8(g~h)可知,当外界加载电位-1 200 mV时,新型矿用链钢的断口表现为脆性断裂特征,起裂区分布在边缘。由图8(h)可见,边缘起裂区表现为沿晶断裂,形貌呈冰糖状,说明外加-1 200 mV电位时,极大的促进了阴极析氢,氢原子从材料表面渗入,聚集成氢分子形成氢压,最终导致氢致裂纹,并引发断裂。

图9(a~h)是23MnNiMoCr54钢在不同条件下慢拉伸后断口SEM形貌。23MnNiMoCr54钢的慢拉

伸断口结果展现出的规律与新型矿用链钢基本一致。从断口的低倍扫描图片来看,新23MnNiMoCr54均发生了明显的塑性变形,在干燥空气、模拟矿井水和加载-850 mV电位条件下颈缩程度较大,在加载电位-1 200 mV时,试样的颈缩程度明显小于其他条件。由图9(a~f)可知,在干燥空气、模拟矿井水和加载-850 mV电位条件下的断口均表现韧性断裂特征,中心起裂区由高倍扫描图可见韧窝和撕裂棱,扩展区均伴有裂纹,边缘瞬断区较为平坦。由图9(g)(h)可知,当外界加载电位-1 200 mV时,23MnNiMoCr54钢的断口表现为脆性断裂特征,起裂区分布在边缘。由图9(h)可见,23MnNiMoCr54钢边缘起裂区表现为沿晶断裂,说明外加-1 200 mV电位时,氢原子从材料表面渗入最终导致氢致裂纹和断裂。

2.6 链条性能

新型矿用链钢在轧制成 $\phi 34$ mm棒材后退火处理,经冷编环和闪光焊接后制成链条,按照标准开展链条性能的测试,所得链条的各项性能结果见表4。达到了GB/T 12718—2009中对C级链的指标要求。

3 结论

1)通过降低23MnNiMoCr54钢中Ni、Mo含量并调控Mn、Cr和Nb含量,成功开发出一种经济型矿用链钢,力学性能及淬透性满足标准要求,相对于23MnNiMoCr54钢强度更高,强韧性匹配优异。

2)新型钢在模拟矿井水中的均匀腐蚀行为与

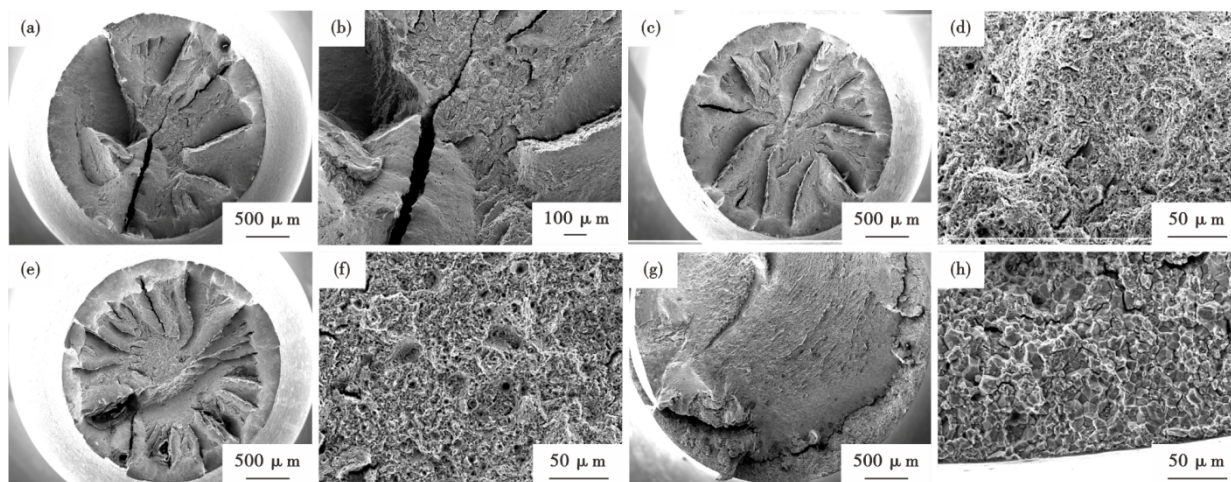


图8 不同条件下新型矿用链钢慢拉伸断口图片:(a)(b)干燥空气,(c)(d)模拟矿井水,(e)(f)模拟矿井水加-850 mV电压,(g)(h)模拟矿井水加-1 200 mV电压

Fig. 8 Picture of slow tensile fracture of new mining chain steel under different conditions: (a)(b) dry air, (c)(d) simulated mine water, (e)(f) simulated mine water with -850 mV voltage, (g)(h) simulated mine water with -1 200 mV voltage

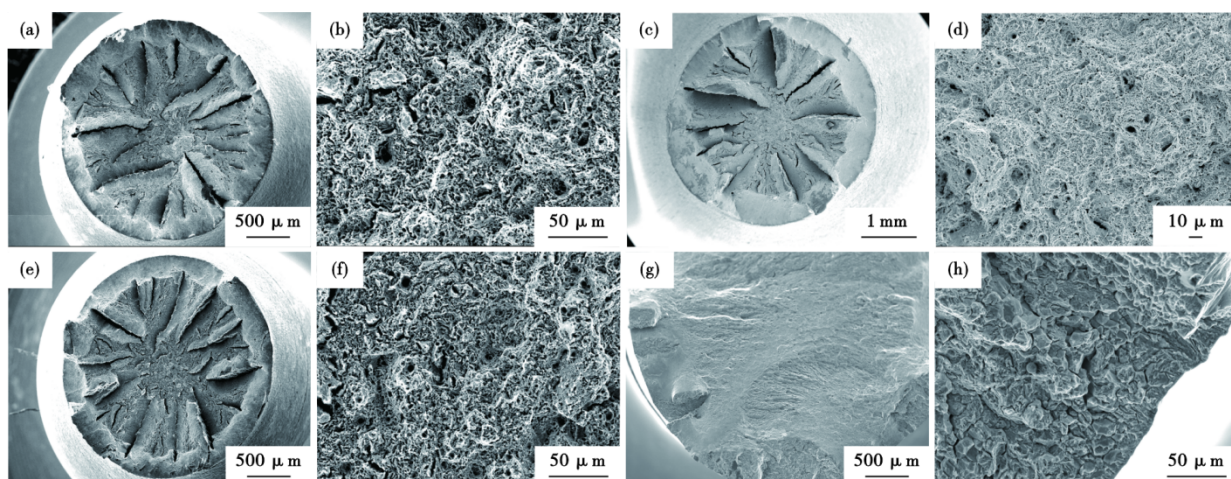


图 9 不同条件下 23MnNiMoCr54 慢拉伸断口图片:(a)(b)干燥空气,(c)(d)模拟矿井水,(e)(f)模拟矿井水加-850 mV 电压,(g)(h)模拟矿井水加-1200 mV 电压

Fig. 9 Picture of slow tensile fracture of 23MnNiMoCr54 steel under different conditions: (a)(b) dry air, (c)(d) simulated mine water, (e)(f) simulated mine water with -850 mV voltage, (g)(h) simulated mine water with -1200 mV voltage

表 4 链条各项性能

Table 4 Various performance of the chain

钢种	破断负荷 / kN	试验负荷下最大伸长率/%	破断时最小伸长率/%	疲劳寿命/次
标准要求	≥1 450	≤1.6	≥12	≥3×10 ⁴
新型矿用链钢	1 710 ± 18	1.5	25.6 ± 3.5	(6.7±1.3)×10 ⁴

参考文献

[1] 卞丽丽, 吴萍, 沈思科, 等. 防腐技术在煤矿的应用及管理研究[J]. 煤矿机械, 2004, 25(4): 130-132.

[2] Remiorz E, Mikuła S. The synergy of fatigue, corrosion and abrasive wear processes in operation of mining round link chains [J]. Archives of Mining Sciences. 2021, 66(1):29-42.

[3] 武兴旺, 王维喜, 马瑞勇, 等. 矿用高强度圆环链用钢的研究进展[J]. 金属热处理, 2008, 33(2):34-35.

[4] 赵海东, 刘佳兴, 张朝磊, 等. 矿用高强度链环钢 23MnNiMoCr54 奥氏体晶粒长大行为的研究[J]. 特殊钢, 2021, 42(2):10-13.

[5] 邢兵辉, 黄亮, 李建军, 等. 链环用 23MnNiMoCr54 合金钢热变形行为与热加工图[J]. 锻压技术, 2025, 50(1): 220-230.

[6] 林田子, 杨颖, 翟晓亮, 等. Nb 含量和热变形参数对纵向变截面耐候桥梁钢变形抗力及组织的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(4): 108-113.

[7] Bai Y, Momotani Y, Chen M C, et al. Effect of grain refinement on hydrogen embrittlement behaviors of high-Mn TWIP steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 651: 935-944.

[8] Hong S G, Kang K B, Park C G. Strain-induced precipitation of NbC in Nb and Nb - Ti microalloyed HSLA steels [J]. Scripta Materialia, 2002, 46(2): 163-168.

[9] Zhang S Q, Huang Y H, Sun B T, et al. Effect of Nb on hydrogen-induced delayed fracture in high strength hot stamping steels [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 626: 136-143.

23MnNiMoCr54 钢相当, 336 h 失重速率为 0.063 6 g/(m²·h), Nb 微合金化通过细化晶粒和形成不可逆氢陷阱, 显著提升了钢的抗氢致开裂性能。

3) 新型钢加工的矿用圆环链破断负荷达 1 710 kN, 疲劳寿命(6.7×10⁴次)及伸长率等指标均满足 C 级链标准, 证明其服役性能可靠。

[10] Lin L, Li B S, Zhu G M, et al. Effect of niobium precipitation behavior on microstructure and hydrogen induced cracking of press hardening steel 22MnB5 [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 721: 38-46.

[11] Cuddy L J. Grain refinement of Nb steels by control of recrystallization during hot rolling [J]. Metallurgical Transactions A, 1984, 15(1): 87-98.

[12] Miao C L, Shang C J, Zurob H S, et al. Recrystallization, precipitation behaviors, and refinement of austenite grains in high Mn, high Nb steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012, 43(2): 665-676.

[13] Charleux M, Poole W J, Militzer M, et al. Precipitation behavior and its effect on strengthening of an HSLA-Nb/Ti steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 32(7): 1635-1647.

[14] Kamimura T, Stratmann M. The influence of chromium on the atmospheric corrosion of steel [J]. Corrosion Science, 2001, 43(3): 429-447.

[15] 黄涛, 郭杰, 魏开华, 等. 外加电位条件下 X100/X80 管线钢的应力腐蚀行为研究[J]. 材料保护, 2023, 56(3): 28-34.

[16] Parkins R N. Predictive approaches to stress corrosion cracking failure [J]. Corrosion Science, 1980, 20(2): 147-166.

[17] 褚武扬, 乔利杰, 李金许, 等. 氢脆和应力腐蚀-基础部分 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.