



冶炼工艺对 23MnNiMoCr54 矿用圆链环 组织及性能的影响

王子豪¹, 毛威昂², 李佳乐³, 闫建升³, 陈洪亮⁴, 张朝磊³

(1 东北大学冶金学院, 沈阳 110819; 2 建龙北满特殊钢有限责任公司, 齐齐哈尔 161041;

3 北京科技大学 碳中和研究院, 北京 100083; 4 长春东北输送链条制造有限公司, 长春 130117)

摘要:通过洛氏硬度测试、EBSD、XRD 及 TEM 表征等方法, 揭示了国产与德国 23MnNiMoCr54 链环硬度与显微组织差异。结果表明, 德国链环因全废钢-电炉冶炼工艺导致残余元素 Cu、N 含量更高, 其平均硬度达 41.32HRC, 且极差仅 0.85HRC, 平均硬度最高且硬度波动最小。高 N 含量导致析出相的密度增加, 通过 Zener 钉扎效应细化原始奥氏体晶粒尺寸至 13.66 μm , 并提升高角度晶界比例至 38.3%, 二者协同阻碍位错运动, 导致德国链环硬度最高。中频淬火过程中, 工件表层温度超过居里温度后表层涡流密度增加, 奥氏体化温度更高, 导致德国与国产链环均呈现出边部原始奥氏体晶粒粗化, 位错密度提高的现象。本研究为国产矿用链环冶炼工艺和热处理技术升级提供了理论依据, 对推动矿山装备关键零部件国产替代进程有重要意义。

关键词:23MnNiMoCr54; 矿用圆链环; 微观组织; 硬度; 晶粒度

DOI:10.20057/j.1003-8620.N250520 **中图分类号:**TG142.1

Effect of Smelting Process on the Microstructure and Properties of 23MnNiMoCr54 Mining Round Chain Links

Wang Zihao¹, Mao Weiang², Li Jiale³, Yan Jiansheng³, Chen Hongliang⁴, Zhang Chaolei³

(1 School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2 Jianlong Beiman Special Steel Co., Ltd., Qiqihar 161041, China; 3 Institute of Carbon Neutrality, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 4 Changchun Northeast Chain Conveyor Manufacturing, Changchun 130117, China)

Abstract: Through Rockwell hardness testing, EBSD, XRD, TEM characterization and other methods, the differences in hardness and microstructure between German and domestic 23MnNiMoCr54 chain link steels were revealed. The results show that the German chain link has higher residual elements Cu and N due to the all-scrap-electric furnace smelting process, with an average hardness of 41.32HRC and a range of only 0.85HRC, showing the highest average hardness and the smallest hardness fluctuation. The high N content leads to an increase in the density of precipitated phases, which refines the original austenite grains to 13.66 μm through the Zener pinning effect and increases the proportion of high-angle grain boundaries to 38.3%. These factors synergistically hinder the movement of dislocations, resulting in the highest hardness of the German chain link. During the medium-frequency quenching process, after the surface temperature of the workpiece exceeds the Curie temperature, the surface eddy current density increases and the austenitization temperature becomes higher, leading to the coarsening of the original austenite grains and an increase in dislocation density at the edges of both German and domestic chain links. This study provides a theoretical basis for the upgrading of smelting processes and heat treatment technologies for domestic mining chain links, and it is of great significance to promote the process of domestic substitution of key parts and components of mining equipment.

Key Words: 23MnNiMoCr54; Round Chain Links for Mines; Microstructure; Hardness; Grain Size

国家能源局数据显示, 2024 年我国原煤产量达 47.6 亿吨, 持续增长的产能需求推动着煤矿机械装备的迭代升级^[1-2]。其中, 刮板输送机作为综采工作面的“动脉”设备, 其关键承载部件—矿用高强度圆环链的服役性能, 不仅直接影响井下煤炭运输系统的运行效率, 更关乎深部开采条件下矿工的生命安

全^[3-5]。这种传统能源领域的技术革新需求, 凸显了在能源结构转型背景下, 基础工业领域核心部件的持续优化对保障国家能源战略安全的重要现实意义。

23MnNiMoCr54 钢作为起源于德国的矿用高强度圆环链的核心材料, 凭借其强度-韧性协同效应及

作者简介: 王子豪 (1995—), 男, 在读博士研究生; **E-mail:** w139519701@icloud.com; **收稿日期:** 2025-08-20

通信作者: 张朝磊 (1984—), 男, 博士, 副教授; **E-mail:** zhangchaolei@ustb.edu.cn

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

优异的焊接性能,已成为全球矿用装备制造的关键材料。我国自 21 世纪初突破该材料冶炼-轧制-热处理全流程工艺控制技术以来^[6],通过微合金化设计成功实现大规格链环的国产化替代,然而在关键性能指标如强韧性匹配、疲劳性能、长周期服役稳定性等方面上,国产 23MnNiMoCr54 钢与德国原产材料相比仍存在一定差距^[7-8]。在实际采煤作业中,链轮通过啮合链环肩部两侧实现矿石的牵引传动,在长期承受交变载荷、冲击及磨损的工况下,链环肩部区域成为最易发生失效的部位。因此,通过系统性对比分析国内外 23MnNiMoCr54 链环肩部的硬度特征与显微组织演变规律,对于优化国内链环钢成分设计、提升材料服役性能,进而保障煤矿安全生产具有重要的工程应用价值与理论指导意义^[9-10]。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

实验材料为国内某链环厂生产的 23Mn-NiMoCr54 矿用链环,三种链环由国内 A、B 两厂家和德国 C 厂家提供的 $\phi 42$ mm 直径棒材经相同的热弯、焊接和热处理工艺制成。国内 A、B 两厂家链环原料棒材采用长流程工艺冶炼,经高炉炼铁、转炉炼钢、二次精炼、连铸、轧制、退火得到,德国 C 厂家链环原料棒材采用短流程工艺冶炼,以废钢为原料,经电弧炉炼钢、二次精炼、连铸、轧制、退火得到。三种链环分别简称为国内 A、国内 B 和德国 C,对样品化学成分进行测定,测定结果见表 1。从表 1 中可以看出,在三家企业生产的 23MnNiMoCr54 钢中,主要合金元素 C、Si、Mn、Ni、Cr、Mo 的含量较为一致,成分上的差异主要集中在 Cu、N 元素。国内 A 与 B 样品的 Cu、N 元素含量显著低于德国 C 样品,这是由于短流程工艺以来源复杂的再生钢铁为主原料,常含有较多杂质元素,经电弧炉冶炼后成品中 Cu、N 残余元素含量较高。

1.2 实验方法

首先沿虚线从样品的弯曲部位切下一段圆弧,

沿圆弧中心横截面切为上下两半,取上半部分样品在距离中心横截面 10 mm 的位置,沿链环轴线方向在肩部切取样品,如图 1 所示。对国内 A、国内 B、德国 C 三个样品的肩部试样进行处理后,均匀选取 20 个测试点,参照国家标准使用洛氏硬度计进行硬度测试。试验参数设定为载荷 150 kg,加载时间 10 s,每个测试点独立测试并记录数据。

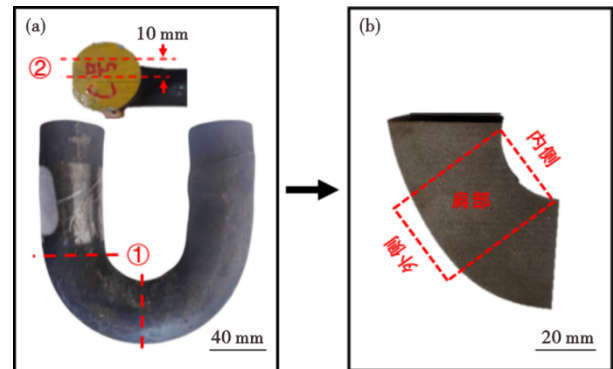


图 1 (a)链环取样方式,(b)样品测试区域

Fig. 1 (a) chain sampling method, (b) sample test area

在国内 A、国内 B、德国 C 样品肩部的靠外侧、心部、内侧分别切取两组 10 mm×10 mm×5 mm 的试样块,将其中一组磨抛至表面无划痕后使用 4% 硝酸酒精侵蚀 6~8 s,取出后用无水乙醇冲洗并冷风吹干,通过扫描电子显微镜(SEM)观察其组织形貌。对另一组试样进行打磨和机械抛光后,使用振动抛光仪抛光 3 h,取出后用无水乙醇清洗并吹干,通过电子背散射衍射(EBSD)技术分析显微组织特征及晶体取向分布。并采用 X 射线衍射(XRD)检测试样,设置参数 2θ 为 $40^\circ\sim 110^\circ$,步长为 0.5° 进行扫描。所得 XRD 图谱采用 Jade6.5 和 Origin 软件进行物相分析及衍射图谱拟合处理。

在各样品肩部取 10 mm×10 mm×10 mm 的立方体和 10 mm×10 mm×0.3 mm 薄片。对于 10 mm×10 mm×10 mm 试样,在磨抛侵蚀后,进行表面喷碳处理。在喷碳表面用小刀划出约 1 mm×1 mm 大小的方格后,放入 4% 硝酸酒精剥离液中分离碳膜,用

表 1 国内外 23MnNiMoCr54 矿用链环化学成分对比(质量分数)

Table 1 Comparison of chemical composition (mass fraction) of 23MnNiMoCr54 mining chain links between domestic and international standards

编号	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	S	P	N
国内 A	0.22	0.20	1.27	0.07	1.00	0.51	0.55	0.030	0.004	0.009	0.004 4
国内 B	0.23	0.20	1.22	0.01	1.04	0.55	0.56	0.030	0.003	0.007	0.006 5
德国 C	0.24	0.18	1.27	0.11	0.97	0.53	0.56	0.030	0.007	0.006	0.010 3

铜网捞取碳膜经历去离子水、无水乙醇清洗并用滤纸吸干水分。对于10 mm×10 mm×0.3 mm薄片则使用砂纸打磨至40 μm,用打孔机冲成φ3 mm圆片,装入双喷减薄仪,以8%~10%高氯酸为电解液,在30~50 V电压、50~100 mA电流下减薄至透光。使用去离子水、无水乙醇清洗并用滤纸吸干水分后,装入透射电子显微镜确定析出形貌及结构,结合能谱仪测定成分,并记录观察条件、图像及衍射花样等数据进行分析。

2 实验结果及讨论

2.1 洛氏硬度

由图2所示的国内A、国内B、德国C样品肩部区域硬度分布曲线可知,德国C样品的硬度明显高于国内A、B样品。其平均硬度为41.32HRC,而国内A、B样品的平均硬度仅为38.63HRC和37.73HRC,分别高出约7.2%和9.8%。从数据波动特征来看,国内A、德国C样品不同位置间的硬度极差为0.65HRC和0.85HRC,明显低于国内B样品的3.05HRC。较高的硬度及较小的波动均表明德国C样品可能具有更优异的强度和组织均匀性。

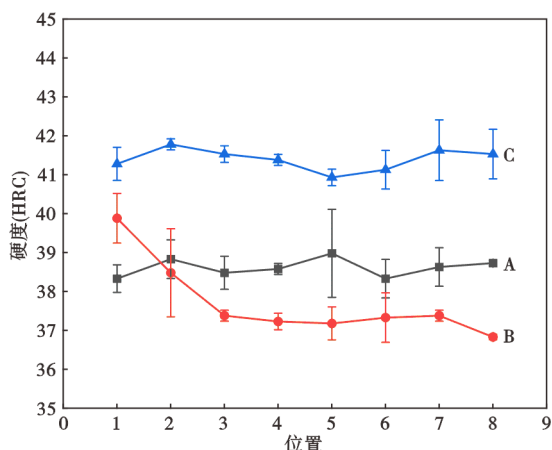


图2 样品硬度测试结果

Fig. 2 Sample hardness test results

2.2 原奥氏体晶粒尺寸

通过金相显微镜统计国内A、国内B、德国C样品肩部原始奥氏体晶粒尺寸如图3所示,根据统计结果绘制样品间不同位置晶粒尺寸变化趋势图如图4所示。C样品的晶粒尺寸明显小于国内A、B样品,平均晶粒尺寸约为13.50 μm,而国内A、B样品的平均晶粒尺寸分别为16.50 μm和

15.67 μm。同时,观察国内A、国内B、德国C样品肩部外侧、心部、内侧的晶粒尺寸变化趋势,均出现心部晶粒尺寸较细而两侧较粗的特点。

这是由于23MnNiMoCr54链环钢在中频感应加热淬火过程中,磁-热耦合效应显著影响奥氏体化行为。当加热达到居里温度约760 °C时,材料由铁磁相转变为顺磁相,导致加热层分化为外层顺磁区与内层铁磁区的双层结构。由于顺磁层磁导率骤降,焦耳热生成核心从表面转移至两相界面,形成涡流密度峰值带。这种动态热源推进机制理论上应促使奥氏体化前沿由表及里单向扩展^[11-12]。然而,实际生产中受限于中频加热的短时特性,顺磁层仅推进至距表面2~3 mm深度未能抵达心部,因此,圆链环表面加热温度更高使其原始奥氏体晶粒粗化。

2.3 显微组织

国内A、国内B、德国C样品扫描电子显微镜(SEM)组织如图5所示,国内A、国内B、德国C样品的显微组织均以回火马氏体为主,可以观察到明显的马氏体板条形貌。

采用EBSD获得了各样品的IPF图,如图6(a)~(c)所示。并通过Channel5软件统计得国内A、国内B、德国C样品的高角度晶界(>15°)分别占比34.0%、26.5%、38.3%^[13]。图6(d)~(f)为基于EBSD数据统计的马氏体板条宽度频率分布图,显示了三个样品的板条宽度主要集中在0.3~0.6 μm区间,平均宽度分别为0.555、0.568、0.568 μm,差异较小。

使用XRD检测样品的残余奥氏体以及马氏体位错密度,衍射图谱如图7所示。结果显示所有样品均呈现典型的马氏体结构衍射峰,主要衍射晶面为(110)、(200)、(211)和(220),而面心立方结构衍射峰并未检测到,表明马氏体相为基体主要组成相,无明显残余奥氏体。

根据Williamson-Hall方法^[14],X射线衍射峰的宽化是晶粒尺寸效应和位错引起的微应变共同作用的结果,而当马氏体基体的平均晶粒尺寸大于100 nm时,晶粒尺寸导致的宽化可忽略,峰宽化主要由位错微应变主导。因此,通过公式推导,可使用XRD得到的数据定量计算位错密度。根据图7中XRD数据,对各试样获得的不同角度峰高和峰宽采用式(1)进行位错密度计算^[15]。

$$\delta_{hkl} \cos \theta_{hkl} = 2\varepsilon \sin \delta_{hkl} \quad (1)$$

式中, δ_{hkl} (°)为XRD图谱中不同角度处的半峰宽;

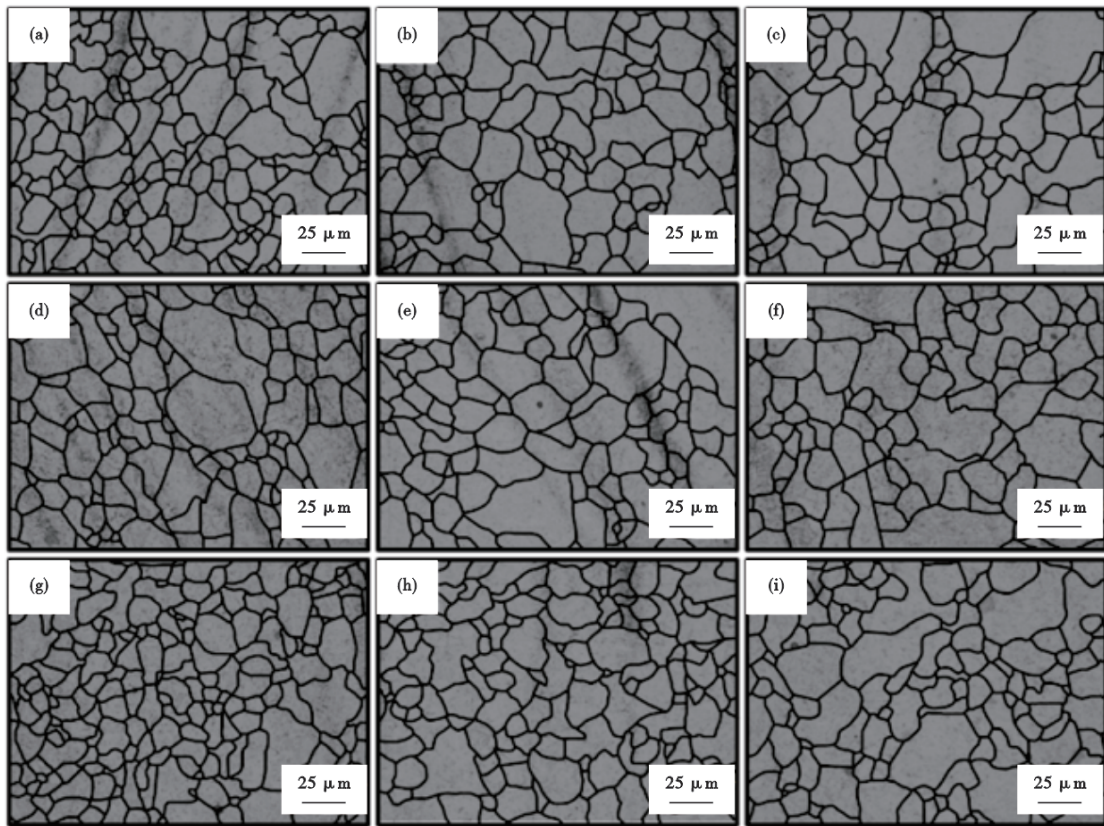


图 3 原始奥氏体晶粒图 OM: (a) 外侧, (b) 心部, (c) 内侧为国内 A 样品; (d) 外侧, (e) 心部, (f) 内侧为国内 B 样品; (g) 外侧, (h) 心部, (i) 内侧为德国 C 样品

Fig. 3 OM images of prior austenite grains : (a) outer region, (b) center region, (c) inner region of domestic A sample; (d) outer region, (e) center region, (f) inner region of Domestic B sample; (g) outer region, (h) center region, (i) inner region of German C sample.

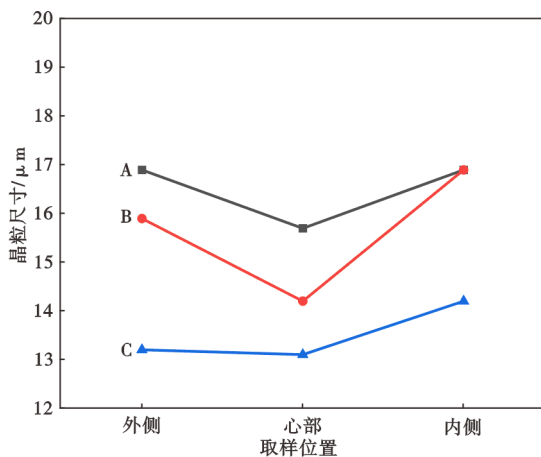


图 4 样品原始奥氏体尺寸变化趋势图

Fig. 4 Original austenite grain size variation trends

θ_{hkl} ($^\circ$) 为峰值所在角度的一半; ϵ (%) 为微应变。拟合得 ϵ 后由式 (2) 计算即可得到位错密度。

$$\rho = 14.4 \frac{\epsilon^2}{b^2} \quad (2)$$

式中, ρ 为位错密度, m^{-2} ; b 为伯氏矢量, 取 0.248 nm 。

微应变和位错密度的变化趋势绘制于图 8。由图 8 中可知, 国内 A、国内 B、德国 C 样品之间的位错密度差异并不明显, 但同一样品的不同位置之间位错密度与微应变均呈现出心部较高而两侧较低的现象。在中频感应淬火时, 圆链环两侧奥氏体化温度更高, 奥氏体化更充分, 冷却过程中发生马氏体相变时体积膨胀更显著。这种非扩散型剪切相变产生的晶格畸变能更大, 导致更高密度的位错作为应力释放的载体, 因此, 两侧的位错密度更高。

2.4 析出相

通过透射电子显微镜 (TEM) 对国内 A、国内 B 及德国 C 样品的析出相分布进行观察, 结果如图 9 所示, 对应的衍射标定如图 10 所示。结合衍射标定结果分析可知, 析出相主要为 $M_{23}C_6$ 型碳化物及 Al (C, N)。对比图 9 中各样品的析出相分布特征可见, 德国 C 试样中析出物数量显著多于国内 A、B 试样。经定量统计, A、B、C 样品中每单位面积 ($1 \mu m^2$)

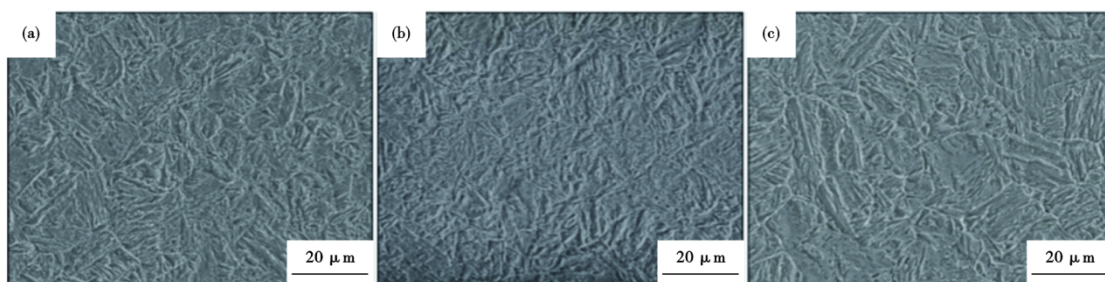


图 5 SEM 图像: (a) 国内 A 样品, (b) 国内 B 样品, (c) 德国 C 样品

Fig. 5 SEM micrographs: (a) domestic sample A, (b) domestic sample B, (c) German sample C

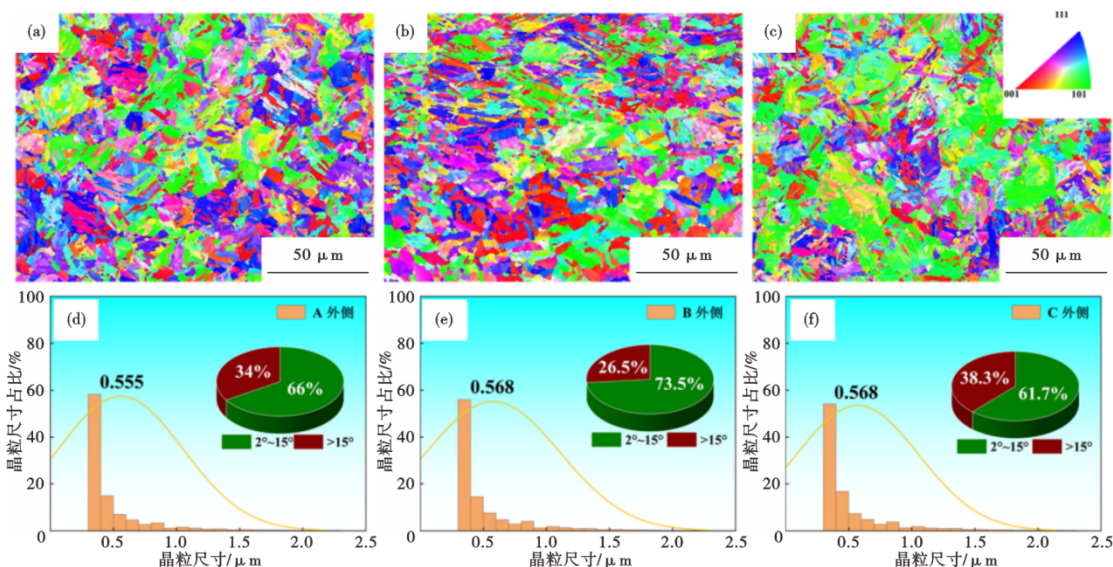


图 6 IPF 图及板条宽度频数分布图: (a) (d) 国内 A 样品; (b) (e) 国内 B 样品; (c) (f) 德国 C 样品;

Fig. 6 IPF maps and lath width frequency distribution histograms: (a, d) domestic sample A; (b, e) domestic sample B; (c, f) German sample C

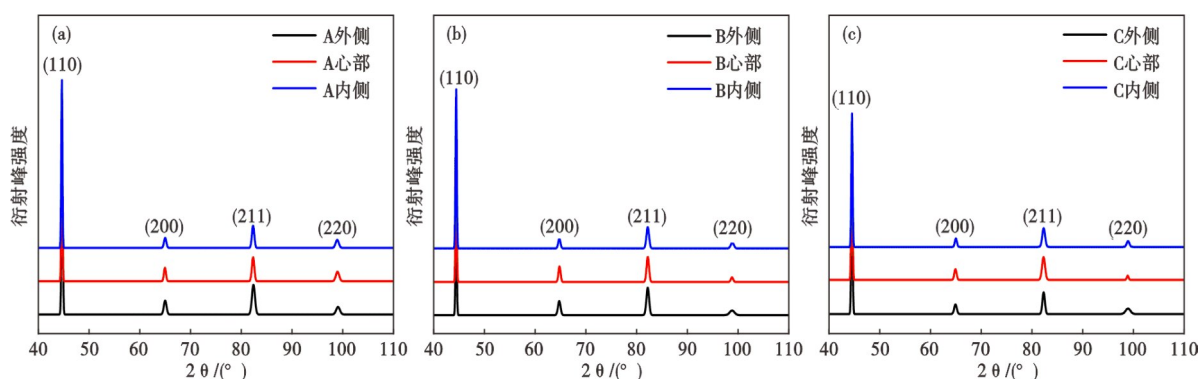


图 7 XRD 衍射图谱: (a) 国内 A 样品; (b) 国内 B 样品; (c) 德国 C 样品;

Fig. 7 XRD diffraction map of samples A, B, and C: (a) domestic sample A; (b) domestic sample B; (c) German sample C

析出物数量分别为 5.1、3.2、8.3 个, 如图 10(c) 所示, 其析出物数量分别较国内 A、B 样品高出 62.7% 和 159.4%。

德国样品的高氮含量促进 AlN 析出相大量形成, 在奥氏体化过程中发挥双重作用: 一方面, 析出相通

过 Zener 钉扎强力抑制晶界迁移, 显著细化原始奥氏体晶粒; 另一方面, 钉扎作用阻碍晶界合并与再结晶演化, 显著提升高角度晶界比例至 38.3%。晶粒细化与高角度晶界协同强化的机制, 共同提升了位错运动阻力, 成为其高硬度及均匀性能的核心基础。

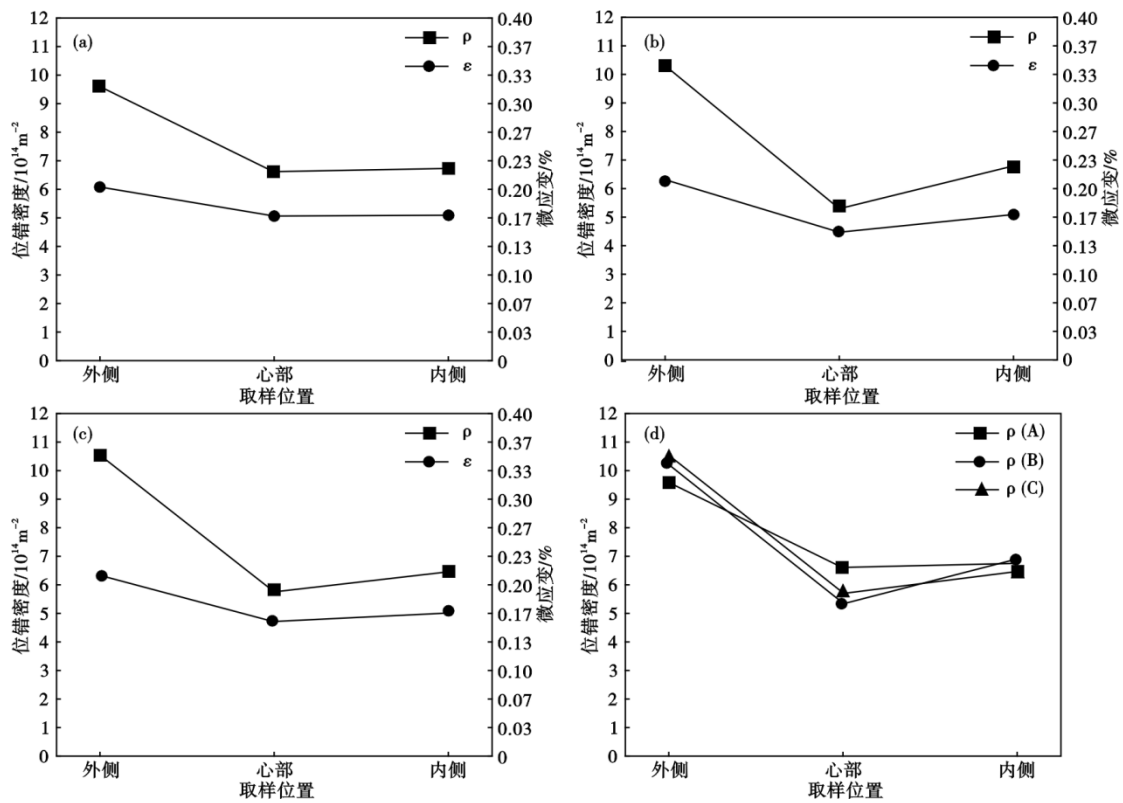


图 8 位错密度及微应变: (a)国内 A 样品, (b)国内 B 样品, (c)德国 C 样品, (d)样品对比

Fig. 8 Dislocation density and microstrain : (a) domestic sample A, (b) domestic sample B, (c) German sample C, (d) sample comparative

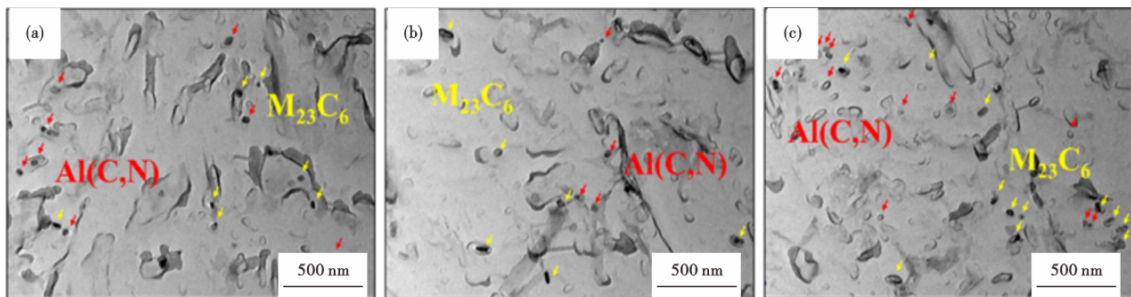


图 9 析出相分布: (a)国内 A 样品, (b)国内 B 样品, (c)德国 C 样品

Fig. 9 Precipitate distribution : (a) domestic sample A, (b) domestic Sample B, (c) German sample C

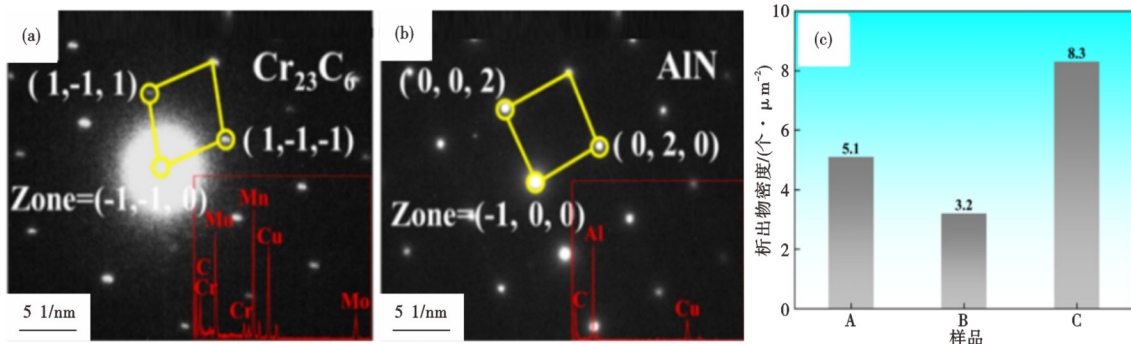


图 10 衍射斑标定: (a) $M_{23}C_6$, (b)AlN, (c)析出相密度统计

Fig. 10 Diffraction spot calibration : (a) $M_{23}C_6$, (b) AlN, (c) density of the precipitated phase

3 结论

1) 国内外23MnNiMoCr54钢的成分差异主要体现在残余元素Cu、N上。德国C样品的平均硬度较国内A、B样品分别高出7.2%和9.8%,且硬度极差仅0.85HRC,分布更均匀。德国C样品因采用废钢短流程冶炼工艺,其Cu和N含量显著高于国内样品,高N含量通过促进AlN等氮化物析出,强化基体并抑制晶粒粗化,是硬度提升的关键因素。

2) 德国C样品的平均原始奥氏体晶粒尺寸仅为13.66 μm ,而国内样品为15.67、16.35 μm 。所有样

品均呈现心部晶粒细、两侧粗的特征,这与中频感应淬火过程中的磁-热耦合效应相关,顺磁层仅推进至表面2~3 mm深度,导致外侧奥氏体化更充分、晶粒粗化。

3) EBSD分析显示德国样品的高角度晶界比例(38.3%)高于国内样品(26.5%~34.0%),表明其晶界钉扎效应更强。TEM证实德国样品析出相(M_{23}C_6 碳化物、AlN)密度显著更高,较国内A、B样品分别增加62.5%和160%。AlN析出相通过Zener钉扎作用细化晶粒并提升高角度晶界比例,协同强化基体,解释了其高硬度成因。

参考文献

- [1] 王维喜, 马瑞勇, 武兴旺, 等. 矿用高强度圆环链及其热处理的研究进展[J]. 金属热处理, 2009, 34(8): 102-105.
- [2] 刘进德, 卢俊玲, 王亮, 等. 二次回火对23MnNiCrMo54钢矿用接链环疲劳循环次数的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(4): 137-142.
- [3] 刘艳梅, 陈静, 王铁钢, 等. 热处理对40CrNiMoA钢板焊接接头组织及力学性能的影响[J]. 特殊钢, 2022, 43(4): 95-99.
- [4] 李硕, 方光锦, 汪青芳, 等. 23MnNiMoCr54钢的热变形行为[J]. 金属热处理, 2021, 46(5): 127-132.
- [5] Wang F Y, Zhu Y F, Zhou H H, et al. A novel microstructural design and heat treatment technique based on gradient control of carbon partitioning between austenite and martensite for high strength steels[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(8): 1847-1857.
- [6] 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.
- [7] Zhu Q, Gao J H, Zhao H T, et al. Effects of residual elements on the microstructure and mechanical properties of a Q&P steel[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2025, 221: 143-154.
- [8] Zhang F, Li J, Liu W, et al. The Thermodynamics and Kinetics of a Nitrogen Reaction in an Electric Arc Furnace Smelting Process[J]. Materials, 2022, 16(1): 33.
- [9] 李硕, 汪青芳, 王芝林, 等. 23MnNiMoCr54钢矿用圆环链的疲劳失效分析[J]. 金属热处理, 2018, 43(9): 233-237.
- [10] Lu Q, Ma Y G. Mining chain failure analysis and quality improvement[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 394: 042061.
- [11] Chen J, Shi Z R, Luo X B, et al. Micro-alloying effects on microstructure and weldability of high-strength low-alloy steel: A review[J]. Materials, 2025, 18(5): 1036.
- [12] 张晓军, 朱世红. 矿用高强度圆环链关键制造工艺机理分析[J]. 煤矿机械, 2014, 35(8): 142-143.
- [13] Liu M, Nambu S, Zhou K, et al. On the influence of grain boundary misorientation on the severe plastic deformation of aluminum bicrystals: A three-dimensional crystal plasticity finite element method study[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50(5): 2399-2412.
- [14] Williamson G K, Smallman R E. III. Dislocation densities in some annealed and cold-worked metals from measurements on the X-ray debye-scherrer spectrum[J]. Philosophical magazine, 1956, 1(1): 34-46.
- [15] Zhang H, Zhang G, Zhou H, et al. Influence of cooling rate during cryogenic treatment on the hierarchical microstructure and mechanical properties of M54 secondary hardening steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 851: 143659.