

## 奥氏体化温度对辊压圈圆成型 NM360-YLJ 耐磨钢组织与性能的影响

刘红艳<sup>1,2</sup>, 陈子刚<sup>2</sup>, 邓想涛<sup>1</sup>, 王昭东<sup>1</sup>

(1 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110819; 2 河钢集团邯钢公司, 邯郸 056015)

**摘要** 设计研发了 360 度辊压成型压路机振轮耐磨钢 NM360-YLJ, 研究表明:最佳的奥氏体化温度为 870 ~ 910 °C, 淬火马氏体板条上分布着沿多个惯析方向析出的碳化物, 宽度 15 ~ 50 nm, 长度 60 ~ 110 nm, 马氏体板条束内包含多个由大角度晶界构成的板条块, 大角度晶界取向差主要分布在 60° 左右, 所占比例为 63.5% ~ 66.9%, 马氏体块宽度 0.08 ~ 6.6 μm, 钢的屈服强度 980 ~ 1 000 MPa、抗拉强度 1 182 ~ 1 198 MPa、延伸率 22% ~ 25%、表面维氏硬度值 363 ~ 379HV, -40 °C 低温冲击功 160 ~ 175 J, 具有良好的强韧性匹配以及辊压成型性能。

**关键词** 临界奥氏体化温度 辊压成型 压路机振轮 NM360-YLJ 耐磨钢 组织与性能

## Effect of Austenitizing Temperature on Microstructure and Properties of Roll Pressing Round Formed NM360-YLJ Wear Resistant Steel

LIU Hongyan<sup>1,2</sup>, CHEN Zigang<sup>2</sup>, DENG Xiangtao<sup>1</sup>, WANG Zhaodong<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Rolling Technology and Continuous Rolling Automation, Northeast University, Shenyang 110819; 2 HBIS Group Hansteel Company, Handan 056015)

**Abstract** NM360-YLJ wear-resistant steel for press vibrating wheel of 360 degree roll pressing round-formed roller was designed. The results show that the optimum austenitizing temperature of steel is 870 ~ 910 °C, carbides precipitated in multiple habitual directions are distributed on the martensite lath with a width of about 15 ~ 50 nm and a length of about 60 ~ 110 nm, there are several large angle grain boundary structures in quenched martensite lath bundles, and the orientation difference distribution is mainly in 60° with martensite proportion 63.5% ~ 66.9% and martensite width 0.08 ~ 6.6 μm. The properties of steel are yield strength 980 ~ 1 000 MPa, tensile strength 1 182 ~ 1 198 MPa, elongation 22% ~ 25%, surface vickers hardness value 363 ~ 379HV and low temperature impact energy at -40 °C 160 to 175 J, better strength-toughness matching and roll pressing formed performance is obtained.

**Material Index** Critical Austenitizing Temperature, Roll Pressing Forming, Roller Vibrating Wheel, NM360-YLJ Wear Resistant Steel, Microstructure and Properties

目前国内各大重型机械制造厂使用的压路机振轮用钢主要采用 Q355 级别, Q355 级别钢板在压路机振轮辊压圈圆过程中呈现良好的成型性能, 但由于抗拉强度较低, 在 500 MPa 左右, 耐磨性差, 在使用过程中易出现压路机振轮磨损速度快、接触到高硬度材料时易发生变形等问题。使压路机振轮使用寿命缩短, 更换压路机振轮耗时、耗力、影响正常使用, 造成较大的经济损失<sup>[1-5]</sup>。

低合金耐磨钢具有强度高、耐磨性好、综合性能好、成本低等优点<sup>[6-7]</sup>, 为提升压路机振轮的使用寿命, 提出采用具有良好强韧匹配的耐磨钢产品替代普通结构钢制造压路机振轮的技术方案。由于耐磨钢产品抗拉强度较高, 作为压路机振轮使用, 对其高强韧性匹配、成型性能等方面具有较大的技术优势和挑战: (1) 振轮基体和焊缝之间承受较大应力, 要求耐磨钢焊缝具有良好的力学性能; (2) 大振幅(2 mm)、低频率、大载重疲劳震动的工况, 要求耐磨钢具有较好

的疲劳性能; (3) 高强度耐磨钢在 360 度辊压圈圆成型后保证良好的圆度和较小的直线度(< 2 mm); (4) 高强耐磨钢在 360 度辊压圈圆成型过程中, 易产生裂纹。

压路机振轮采用耐磨钢产品进行生产制造, 为了保证良好的成型性能, 即整板 360 度辊压圈圆成型精度, 以及压路机振轮在反复大载重、疲劳震动工作时不开裂、不变形的要求, 同时又具有良好的耐磨性, 设计研发了新型耐磨钢 NM360-YLJ: 抗拉强度  $\geq 1 100$  MPa, 延伸率  $A_{50} \geq 20\%$ , -40 °C 低温冲击功  $\geq 120$  J。良好的高强韧性匹配和辊压成型性能以及高耐磨性能, 是提高工程机械的有效服役寿命、降低钢铁材料的磨损消耗的重要保证<sup>[8-15]</sup>。高性能的压路机振轮耐磨钢的研发和应用, 可以满足恶劣工况下压路机的使用要求, 提高压路机振轮寿命, 提高工作效率, 降低成本, 节省资源。

### 1 实验材料与方法

新型耐磨钢 NM360-YLJ 生产工艺流程为: 铁水

预处理脱硫-100 t 转炉初炼- LF- RH- 260 mm 大板坯连铸-铸坯堆垛缓冷-铸坯加热炉-奥氏体再结晶区粗轧-奥氏体未再结晶区精轧-冷却-矫直-探伤-抛丸-淬火-回火-力学性能检测-定尺-喷标-入库。  
耐磨钢 NM360-YLJ 冶炼生产,采用洁净钢冶

炼、关键合金元素窄成分控制,以及大板坯连铸采用电磁搅拌及动态轻压下等核心技术。铸坯厚度为 260 mm,宽度为 1 900 mm。其中  $Ca/S \geq 1$ ,  $N \leq 0.0035\%$ ,  $P \leq 0.010\%$ ,  $S \leq 0.002\%$ 、 $H \leq 0.00022\%$ ,NM360-YLJ 钢的化学成分见表 1 所示。

表 1 实验 NM360-YLJ 钢的化学成分/%  
Table 1 Chemical composition of experimental NM360-YLJ steel/%

C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Cr	Mo	B
0.11~0.17	0.27~0.45	0.9~1.4	$\leq 0.010$	$\leq 0.003$	0.010~0.025	0.010~0.025	0.30~0.50	0.10~0.20	0.0008~0.0015

铸坯缓冷后二次再加热至 1 160 °C,然后采用两阶段轧制工艺轧制成 32 mm。初轧温度为 1 100 °C,终轧温度为 870 °C,轧后钢板水冷至 650 °C 后空冷至室温。热处理实验在箱式电阻炉中进行,选取不同奥氏体化温度,研究临界热处理工艺对辊压圈圆成型压路机振轮耐磨钢组织与性能的影响。

对淬火后 200 °C 回火热处理的钢板进行拉伸性能检测,取样方向垂直于钢板轧向,样品尺寸按照国标 GB/T 2975-2018 进行加工,平行段直径为 10mm,标距 50 mm,并按照 GB/T 228-2015 进行室温拉伸试验检测;按照 GB/T 2975-2018 制备标准表面布氏硬度试样,并按照 GB/T 231.1-2005 进行表面布氏硬度检测试验;对实验钢进行了 -40 °C 冲击实验,按照 GB/T 2975-2018 制备 V 型冲击试样,试样尺寸

为 10 mm × 10 mm × 55 mm,取样方向平行轧向。辊压成型时,首先在瑞典乌斯维肯 3000T 折弯机完成母材两端的预弯工作,然后在意大利 FACCIN 法庆三辊卷圆机上进行母材的圈圆,最后进行点焊定型和后续焊接工作。利用奥林巴斯光学电子显微镜(OlympusBX51)和蔡司扫描电子显微镜(ZELSS ULTRA-55)进行微观组织观察。不同热处理工艺处理试验钢的析出利用 FEITecnaiG2F20 透射电镜(TEM)进行表征。透射样品尺寸为直径 3 mm,厚度约为 50 μm 的圆片,并进行电解双喷减薄。采用 Image-ProPlus 图像分析软件对实验钢的析出相大小进行了统计分析。

## 2 耐磨钢 NM360-YLJ 连续冷却相变研究

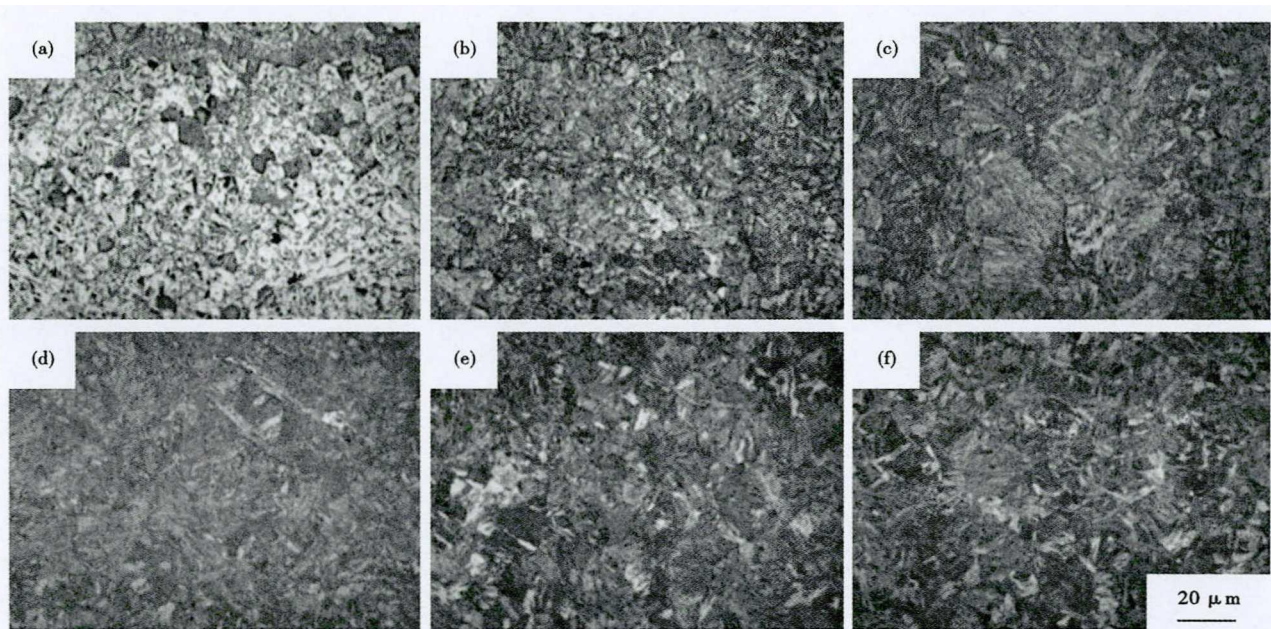


图 1 NM360-YLJ 钢 950 °C 10 min 加热,以速率/ $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$ :(a)0.1, (b)3, (c)5, (d)10, (e)20, (f)40 冷却至室温的组织形貌

Fig.1 Microstructure of NM360-YLJ steel heated at 950 °C for 10 min then with rate/ $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$ :(a)0.1, (b)3, (c)5, (d)10, (e)20, (f)40 cooling to room temperature

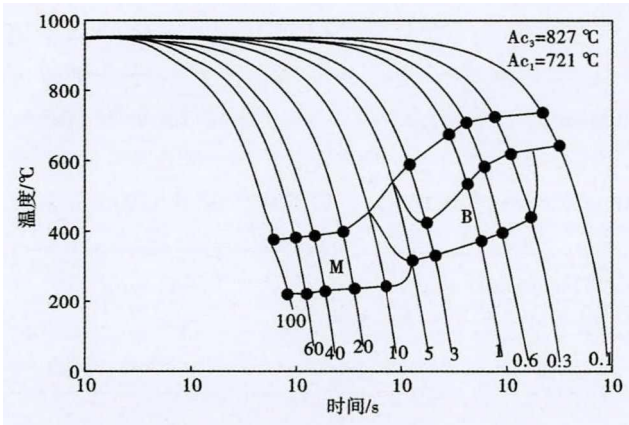


图2 NM360-YLJ 钢静态连续冷却温度(CCT)曲线  
Fig.2 Static CCT curves of NM360-YLJ steel

对耐磨钢 NM360-YLJ 不同冷速下的连续冷却相变曲线进行了研究,结合微观组织绘制出了静态 CCT 曲线,为微观组织和综合性能的调控提供理论依据。

利用 DIL805L 相变膨胀仪测出该成分体系加热过程的奥氏体转变温度和冷却过程的马氏体相变温度以及不同冷却速率的相变转变规律。将低合金耐磨钢 NM360-YLJ 以 10℃/s 的加热速率加热至 500 °C,然后以 0.05 °C/s 的加热速率加热至 1 000 °C 来获得实验钢的  $Ac_1$  和  $Ac_3$  温度,采用同样的加热制度然后以 200℃/s 的冷速冷却至室温,获得马氏体相变温度  $M_s$ 。将试样以 10 °C/s 的速度升温至

950 °C,保温 10 min,然后分别以 0.1、0.3、0.6、1、3、5、10、20、40、60、100 °C/s 的冷却速度冷却至室温来获得不同冷速下的膨胀曲线,结合微观组织(图 1)绘制静态 CCT 曲线(图 2)。

图 1 为不同冷却速率下 NM360-YLJ 耐磨钢的显微组织,可以看到 NM360-YLJ 实验钢在低冷速时为铁素体组织,中冷速为铁素体和贝氏体组织,在冷却速度超过 10 °C/s 时可获得全马氏体组织,这是由于实验钢中添加了 Mn、Cr、Ti、B 等合金元素提高了实验钢的淬透性。

根据图 2 相变点实验可知:(1)该成分体系下  $Ac_3$ (铁素体向奥氏体转变结束温度)温度为 827 °C,  $Ac_1$ (铁素体向奥氏体转变开始温度)温度为 721 °C;(2)当冷却速度达到 200 °C/s,  $M_s$ (马氏体开始转变温度点)温度是 396 °C。

### 3 耐磨钢 NM360-YLJ 热处理过程组织调控

#### 3.1 NM360-YLJ 钢奥氏体化温度对组织性能的影响

以 32 mm 厚度的热轧耐磨钢 NM360-YLJ 为实验材料,根据相变仪测得的相变点温度,选取 790、810、830、870、910、960 °C 六个奥氏体化温度,研究临界热处理工艺对辊压圈圆成型压路机振轮耐磨钢组织与性能的影响规律。将其加热至不同奥氏体化

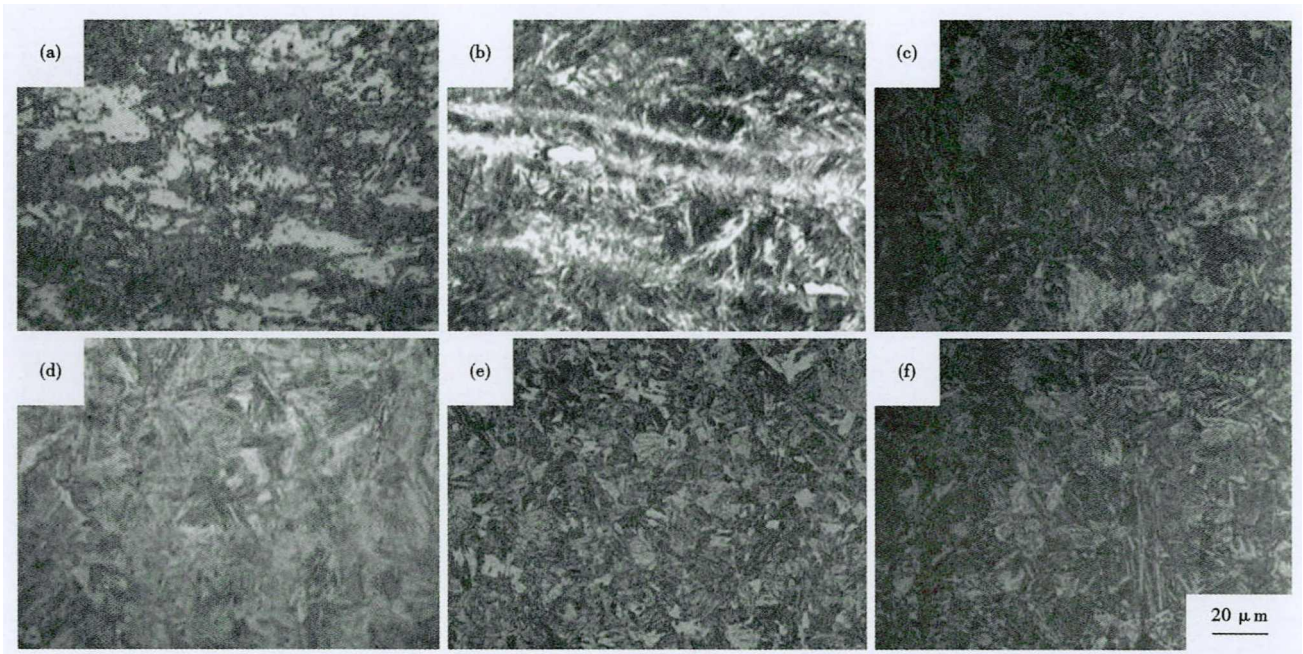


图3 NM360-YLJ 钢(a) 790 °C, (b) 810 °C, (c) 830 °C, (d) 870 °C, (e) 910 °C, (f) 960 °C 奥氏体化温度下淬火的光学显微组织

Fig.3 Optical microstructure of NM360-YLJ steel quenched at austenitizing temperature (a) 790 °C, (b) 810 °C, (c) 830 °C, (d) 870 °C, (e) 910 °C and (f)960 °C

温度保温 64 min, 然后进行水淬, 淬火后显微组织如图 3 所示。从图 3(a~c) 可以看到, 加热温度为 790~830 °C 时, 处于奥氏体和铁素体两相区温度区间, 保温水淬后得到马氏体 + 铁素体的双相组织。从图 3(a) 可以看到, 当加热温度为 790 °C, 保温淬火后组织中含有大量块状铁素体。当加热温度达到 810 °C 时, 奥氏体体积分数增加, 未转变的铁素体逐渐减少, 呈带状分布, 如图 3(b) 所示。图 3(c) 为加热至 830 °C ( $A_{c3}$  温度附近) 淬火后的组织, 该成分体系下  $A_{c3}$  (铁素体向奥氏体转变结束温度) 温度为 827 °C, 铁素体组织体积分数急剧减少, 且尺寸明显的减小, 大多在 8  $\mu\text{m}$  以下。

当奥氏体化温度在  $A_{c3}$  以上时, 组织如图 3(d、e、f) 所示。当淬火温度为 870 °C 和 910 °C 时, 组织全部为板条马氏体, 可以观察到多个不同取向的马氏体板条束, 马氏体板条束平均宽度为 1.0~4.6  $\mu\text{m}$ , 马氏体板条束被分割成多个不同取向的马氏体块。当淬火温度达到 960 °C 时, 奥氏体晶粒严重粗化, 导致最终的实验钢组织粗大, 如图 3(f) 所示。

### 3.2 淬火温度对马氏体亚结构的影响

图 4 为 NM360-YLJ 钢在 790、830、870、960 °C 奥氏体化温度下保温, 然后淬火的透射电镜照片。

从图 4 可以看出, 790 °C 保温淬火后得到的组织中含有大块的铁素体, 由于其缺陷很少, 形貌上呈

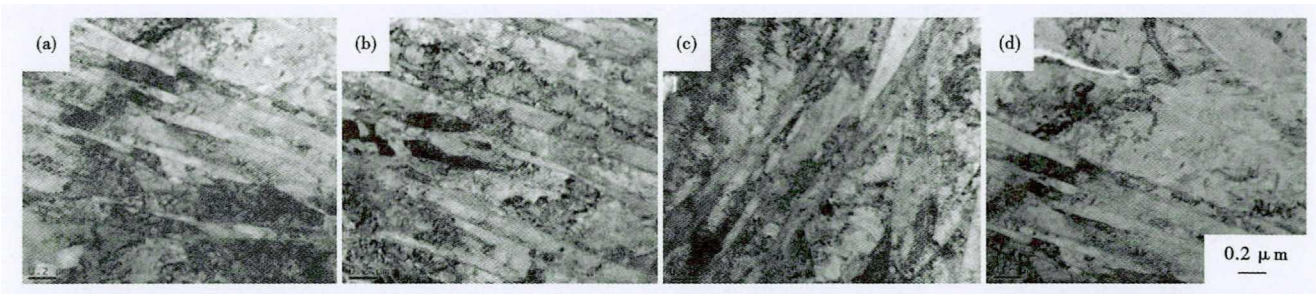


图 4 NM360-YLJ 钢在奥氏体化温度(a) 790 °C, (b) 830 °C, (c) 870 °C 和(d) 960 °C 淬火的透射电镜图片

Fig. 4 TEM pictures of NM360-YLJ steel quenched at austenitizing temperature (a) 790 °C, (b) 830 °C, (c) 870 °C and (d) 960 °C

现亮白色。当在 870 °C 淬火时, 原奥氏体晶界之间存在着少量未转变的铁素体, 尺寸较小且缺陷密度较低。完全淬火后得到了全马氏体组织, 马氏体板条中包含高密度位错, 而且在淬火马氏体板条上分布着沿多个惯析方向析出的碳化物, 碳化物尺度 15~50 nm 宽, 长度 60~110 nm。这是由于 Ms 点温度较高, 发生了自回火现象。

图 5 为耐磨钢 NM360-YLJ 在 870 °C 保温淬火后试样的 EBSD (背散射衍射) 结果。可以看到, 马氏体的 Packet 内存在大角度晶界结构 (取向差大于

15°), Block 内以小角度晶界相邻, 图 5(c) 为试样的晶界图, 图中的深灰色线代表取向差大于 15° 的大角度晶界 (HAGB), 浅灰色线代表取向差小于 15° 的小角度晶界。马氏体板条束内存在以大角度晶界包围的马氏体板条块, 马氏体板条块内以小角度晶界相邻, 马氏体板条束的平均宽度为 0.46  $\mu\text{m}$ 。经过统计分析, 大角度晶界取向差在 60° 左右, 如图 5(d) 所示。大角度晶界所占比例为 66.9%, 增加大角度晶界占比可以提高基体的韧性。

当奥氏体化温度升高至 910 °C 时, 奥氏体晶粒

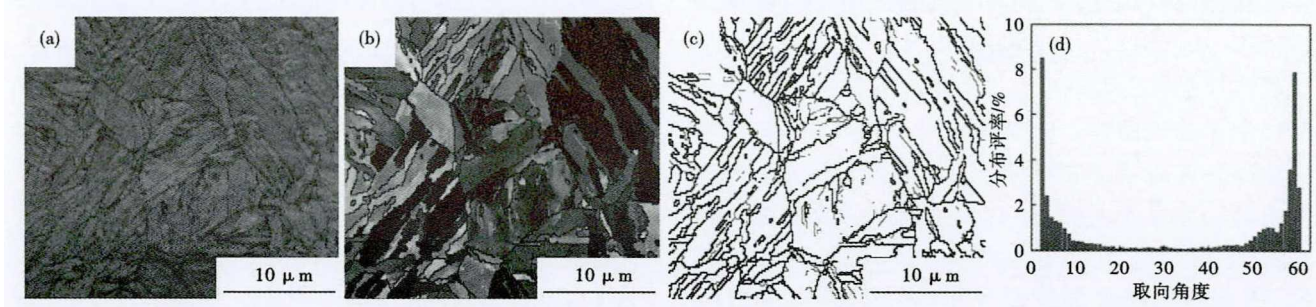


图 5 NM360-YLJ 钢 870 °C 淬火时对应的 EBSD: (a) 带方位分布图, (b) 反极图, (c) 晶界分布和 (d) 取向差分布

Fig. 5 EBSD (electron backscattering diffraction) analysis of NM360-YLJ steel quenched at 870 °C: (a) directional distribution map, (b) azimuth distribution map, (c) grain boundary structure and (d) misorientation distribution

尺寸略有增大,但是变化并不明显,板条马氏体的晶界结构也无明显变化,图 6 为 910 ℃ 保温后淬火组织的 EBSD 分析结果。图 6(a) 表明原奥氏体晶界将组织分成细小、均匀的奥氏体晶粒。根据 6(b) 晶粒取向图和 6(c) 晶界分布图可知,较小的奥氏体晶粒中板条块的尺寸非常细小,板条马氏体的晶界结构无明显变化,马氏体块宽度在 0.1 ~ 6.6 μm,平均宽度为 0.62 μm。根据 6(d) 取向差分布图统计结

果可知,910 ℃ 淬火时大角度晶界所占比例为 63.5%,与 870 ℃ 淬火时大角度晶界比例相比并无明显变化。

当淬火温度为 960 ℃ 时,原始奥氏体晶粒增大,由于马氏体的晶界结构由原始奥氏体晶粒尺寸决定,因此,其结构也随之改变。图 7 为 960 ℃ 淬火组织的 EBSD 分析结果。

从图 7(c) 可以发现,小角度晶界比例显著增

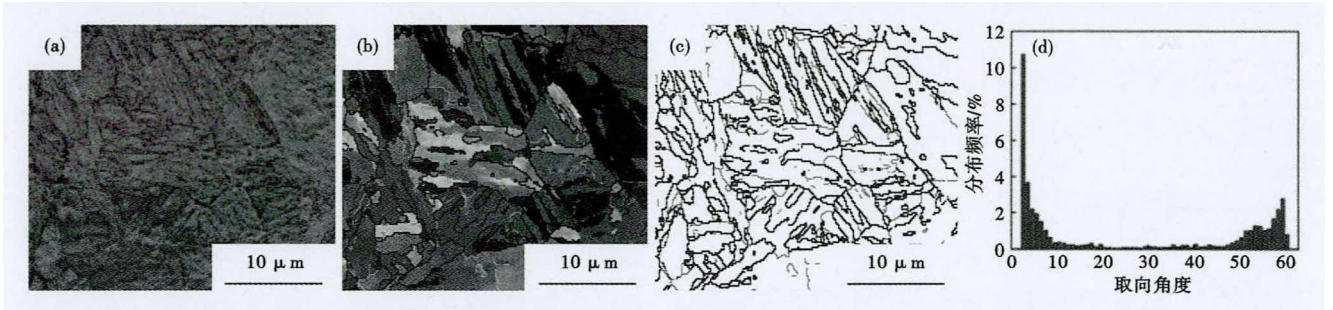


图 6 NM360-YLJ 钢 910 ℃ 淬火时对应的 EBSD:(a)带方位分布图,(b)反极图,(c)晶界分布和(d)取向差分布  
Fig. 6 EBSD analysis of NM360-YLJ steel quenched at 910 ℃:(a) directional distribution map,(b) azimuth distribution map,(c) grain boundary structure and (d) misorientation distribution

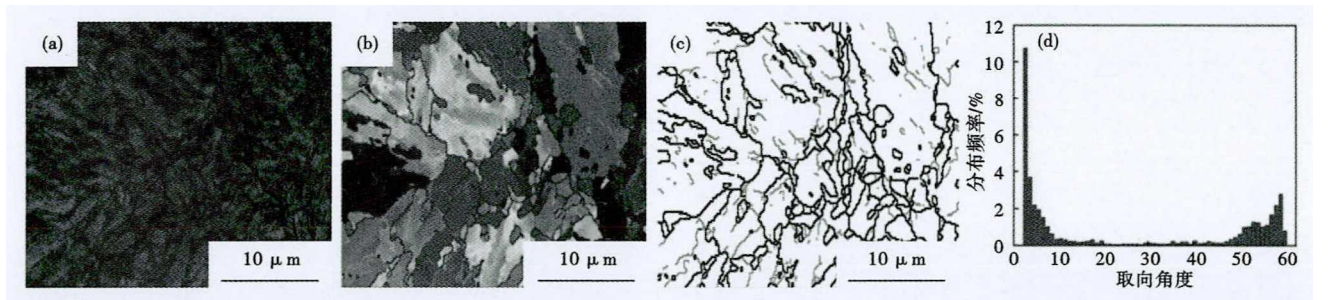


图 7 NM360-YLJ 钢 960 ℃ 淬火时对应的 EBSD:(a)带方位分布图,(b)反极图,(c)晶界分布和(d)取向差分布  
Fig. 7 EBSD analysis of NM360-YLJ steel quenched at 960 ℃:(a) directional distribution map,(b) azimuth distribution map,(c) grain boundary structure and (d) misorientation distribution

加,其中最大 Block 宽度达到 8.2 μm 以上,平均 Block 宽度增加到 1.93 μm。随着淬火温度的升高,960 ℃ 淬火时大角度晶界所占比例下降至 52.2%,如图 7(d) 所示。

通过马氏体板条亚结构规律研究表明,耐磨钢 NM360-YLJ 的马氏体结构中,大角度晶界主要由原始奥氏体晶界、板条束界以及板条块界等组成,小角晶界主要是板条界。由于实验钢的原始奥氏体晶粒尺寸随温度的增加而增加,因此,相应的板条束和板条块的尺寸受到影响,但是板条宽度受原始奥氏体晶粒尺寸影响较小。

#### 4 不同奥氏体化温度淬火对耐磨钢 NM360-YLJ 力学性能的影响规律研究

图 8 展示出了实验钢 NM360-YLJ 力学性能随

奥氏体化温度的变化规律。根据图 8 可知,在 790 ~ 830 ℃ 温度区间淬火后实验钢的屈服强度、抗拉强度以及表面布氏硬度等力学性能随着奥氏体化温度的增加而增大。在 790 ℃ 淬火后实验钢的抗拉强度和屈服强度分别为 1 049 MPa 和 833 MPa,维氏硬度为 303 HV,这是因为在该温度淬火时组织中存在大量未转变的铁素体组织,使其强度和硬度较低。在 830 ℃ 淬火后实验钢的抗拉强度和屈服强度分别为 1 224 MPa 和 1 002 MPa,维氏硬度为 342HV,与 790 ℃ 淬火相比明显增加,因为组织中 铁素体体积分数急剧减少。当淬火温度为 870 ℃ 和 910 ℃ 时,抗拉强度、屈服强度与 830 ℃ 相比并无明显变化,屈服强度在 1 000 MPa 左右、抗拉强度在 1 190 MPa 左右,伸长率在 22% ~ 25%,而表面维氏硬度略有增

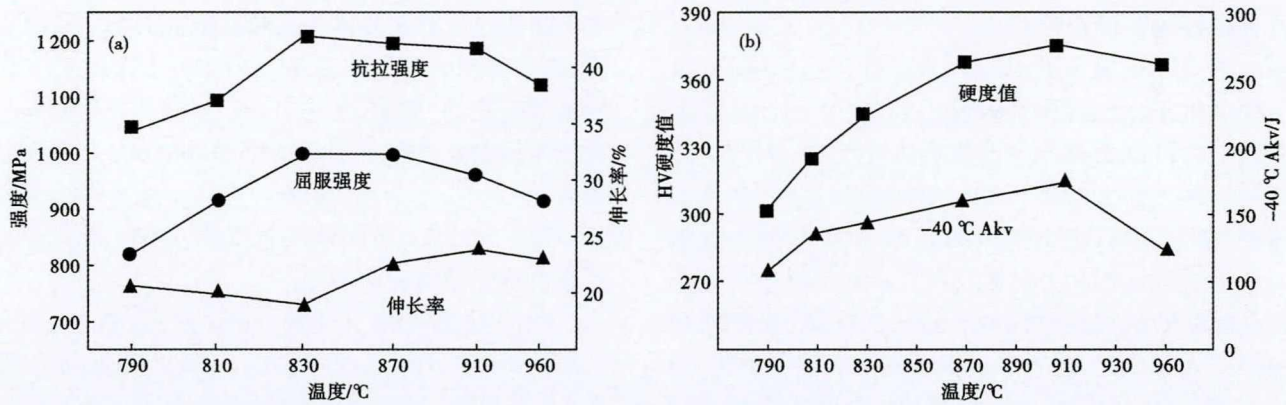


图8 奥氏体化温度 NM360-YLJ 钢力学性能(a)和维氏硬度值和-40 °C冲击功(b)的影响

Fig. 8 Effect of austenitizing temperature on mechanical properties (a) and HV hardness value and -40 °C impact energy (b) of NM360-YLJ steel

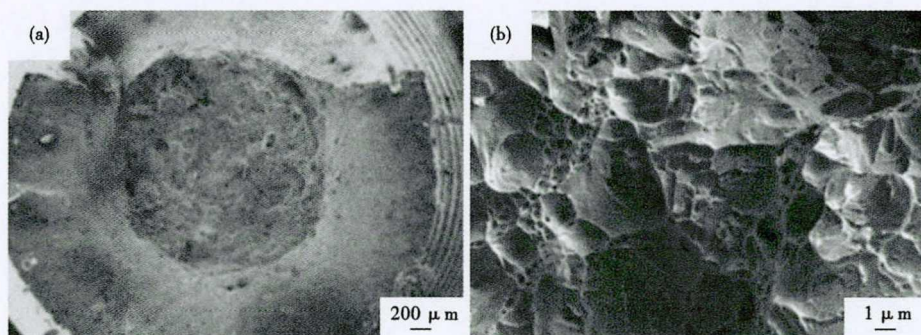


图9 NM360-YLJ 钢在 870 °C 淬火、200 °C 回火后拉伸断口 SEM 宏观(a)和微观(b)形貌  
Fig. 9 SEM (a) macro-and (b) micro-morphology of tensile fracture of NM360-YLJ steel after quenching at 870 °C and tempering at 200 °C

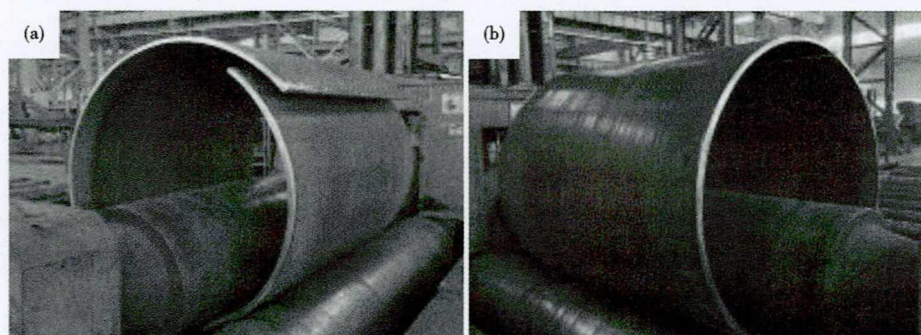


图10 NM360-YLJ 钢 360 度辊压圈圆成型过程(a)和探伤试验(b)

Fig. 10 Circular forming process of 360 degree rolling ring (a) and non-destructive testing (b) of NM360-YLJ steel

加,分别为 363、379HV。当温度达到 960 °C 后,维氏硬度和强度出现明显的下降现象,结合 EBSD 结果可知,在 960 °C 淬火时,晶粒尺寸明显增加,使硬度和强度明显下降。

根据图 8(b) 中的 -40 °C 低温冲击吸收功可知,在 790 °C 淬火时,-40 °C 低温冲击吸收功最低,为 107 J,同时维氏硬度数值也最低,为 302HV,而淬

火温度在 810 ~ 830 °C 时,维氏硬度值随奥氏体化温度升高呈现增加的趋势,-40 °C 低温冲击吸收功也随加热温度略有升高,数值范围在 128 ~ 145 J,此时实验钢微观结构中保留细小铁素体,使其具有较好的冲击韧性。在 870、910 °C 淬火时,NM360-YLJ 实验钢呈现良好的低温冲击韧性,-40 °C 低温冲击功达到 160 ~ 175 J。EBSD 结果表明在 870、910 °C 淬火时,大角度晶界占比较大,大角度晶界可以阻碍裂纹扩展,增加裂纹扩展吸收功,获得良好的低温冲击性能。当淬火温度增加到 960 °C 时,实验钢的冲击吸收功明显下降,为 119 J。因为淬火温度较高,晶粒明显尺寸长大,导致大角度晶界所占比例下降,使冲击性能下降。

图 9 为实验钢 NM360-YLJ 经过 870 °C 淬火、200 °C 回火后拉伸断口 SEM 形貌,图 9(a) 为宏观断口,断口呈“杯锥”状,由纤维区和剪切唇组成,是典型的韧性断裂断口。其中纤维区域面积较大,表明实验钢断裂前发生了较大的塑性变形。图 9(b) 为纤维区分布着大小不同的韧窝,部分韧窝内分布着夹杂物颗粒,尺寸在 2 μm 左右,韧窝较深,表明其

具有良好的拉伸塑性。

根据淬火温度对组织和力学性能的影响,分析结果表明,实验钢 NM360-YLJ 经过 870 °C 淬火、200 °C 回火后可以获得最佳的综合力学性能,因此选择该热处理工艺下的钢板进行辊压成型。图 10 为实验钢 NM360-YLJ 经过 870 °C 淬火、200 °C 回火钢板的辊压成型过程及上机试验图片。对焊缝进行探伤以及成品的圆度和直线度进行三次检测,检测时间间隔一天,最终结果表明该振轮的射线检测(RT)探伤检测结果符合国家一级标准,振轮的圆度为 2 mm,直线度为 2 mm。

压路机振轮采用耐磨钢 NM360-YLJ 进行生产制造,其耐磨和辊压成型性能以及在反复大载重、疲劳震动条件下良好的工作性能,设计研发的 360 度辊压圈圆成型的产品均能满足性能要求:抗拉强度  $\geq 1\ 100\ \text{MPa}$ ,伸长率  $A_{50} \geq 20\%$ , $-40\ \text{°C}$  低温冲击功  $\geq 120\ \text{J}$ 。

## 5 结论

(1) 选择 870 ~ 910 °C 作为奥氏体化温度,研究

奥氏体化温度对实验钢组织和性能的影响。结果表明,淬火得到的马氏体板条上分布着多个惯析方向析出的碳化物,宽度 15 ~ 50 nm,长度 60 ~ 110 nm,马氏体板条束内有若干大角度晶界结构,大角度晶界取向差主要分布在 60° 左右,所占比例为 63.5% ~ 66.9%,马氏体块宽度在 0.08 ~ 6.6  $\mu\text{m}$ ,提高了基体的强韧性匹配。

(2) 屈服强度 1 000 MPa 左右、抗拉强度 1 182 ~ 1 198 MPa、伸长率 22% ~ 25%、表面维氏硬度 63 ~ 379HV,  $-40\ \text{°C}$  低温冲击值  $\geq 160\ \text{J}$ 。

(3) 成功研发和制备了良好的高强韧性匹配和辊压成型性能以及高耐磨性能的压路机振轮耐磨钢 NM360-YLJ,高性能的压路机振轮耐磨钢的研发和应用,可以满足恶劣工况下压路机的使用要求,提高压路机振动轮寿命,提高工作效率,降低成本,节省资源。

国家重点研发计划项目(2017YFB0305104)

## 参考文献

- [1] 邓想涛,王昭东,袁 国,等. HB450 低合金超高强耐磨钢组织与性能[J]. 东北大学学报(自然科学版). 2010,31(4):942-946.
- [2] 邓想涛,王昭东,张 逖,等. HB450 低合金超高强耐磨钢回火过程中的组织性能演变[J]. 钢铁,2011,46(5):60-63.
- [3] 陈剑虹,曹 睿. 焊缝金属解理断裂微观机理[J]. 金属学报,2017,53(11):1427-1444.
- [4] 麻 衡. 在线直接淬火工艺对低碳马氏体钢组织性能的影响[J]. 轧钢,2019,36(6):22-28.
- [5] Hu X F, Jiang H C, Zhao M J, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Welded Joint of a Fe-Cr-Ni-Mo Steel With High-Strength and High-Toughness[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018,54(1):1-10.
- [6] Huang Long, Deng Xiangtao, Li Chengru, et al. Effect of TiC Particles on Three-Body Abrasive Wear Behaviour of Low Alloy Abrasion-Resistant Steel [J]. Wear, 2019, 434-435: 202971.
- [7] Deng Xiangtao, Huang Long, Wang Qi, et al. Three-Body Abrasion Wear Resistance of TiC-Reinforced Low-Alloy Abrasion-Resistant Martensitic Steel Under Dry and Wet Sand Conditions [J]. Wear, 2020:452-453: 203310.
- [8] Yu Xinpan, Wu Huibin, Gu Yang, et al. Effect of Prior Martensite on Bainite Transformation and Microstructure of High-Carbon Nano-Bainitic Steel [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2021:1-8.
- [9] Hvozdet'skyi V. M. Abrasive Wear Resistance of Alloyed Electric-Arc Coatings from Flux-Cored Wires [J]. Materials Science, 2018, 54(1): 40-47.
- [10] Liu Lingyun, Lin Songsheng, Wang Wei, et al. Effect of Electromagnetic Voltage on Wear Resistance of CrAlN Coatings [J]. Surface Engineering, 2021,37(6): 695-701.
- [11] Jin Bingqian, Zhang Nannan, Yu Huishu, et al. Al x CoCrFeNiSi High Entropy Alloy coatings With High Microhardness and Improved Wear Resistance [J]. Surface & Coatings Technology, 2020: 402: 126328.
- [12] Man T H, Liu T W, Ping D H, et al. TEM Investigations on Lath Martensite Substructure in Quenched Fe-0.2C Alloys [J]. Materials Characterization, 2018, 135: 175-182.
- [13] 陈振业,王会岭,赵燕青,等. 新型 V-Ti-B 微合金化调质 Q690E 钢板的开发[J]. 特殊钢,2019,40(1): 1-3.
- [14] 胡日荣,蔡庆伍,武会宾,等. 热处理工艺对 NM500 耐磨钢组织和力学性能的影响[J]. 北京科技大学学报,2013,35(8): 1015-1020.
- [15] 李德发,吴开明,官计生. 夹杂物属性对 NM500 耐磨钢腐蚀性能的影响[J]. 金属热处理,2019,44(11):81-84.

刘红艳(1983-),女,博士研究生(东北大学),河北省“三三三人才工程”第二层次人选,1 100 ~ 2 000 MPa 超高强韧钢的研发与应用。E-mail:liuhongyan@hbisco.com

收稿日期:2021-12-21