

· 工艺技术 ·

# 高品质压路机振轮用耐磨钢 NM360 的开发

姚 宙<sup>1</sup> 刘红艳<sup>1,2</sup> 邓想涛<sup>2</sup> 于光远<sup>1</sup> 许 伟<sup>1</sup>

(1 河钢集团邯郸公司技术中心, 邯郸 056000; 2 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110819)

**摘要** 设计和开发了压路机振轮用耐磨钢 NM360 (C: 0.10 ~ 0.15C, 0.50 ~ 1.50Mn, ≤0.001P, ≤0.008S, 0.20 ~ 0.50Mo, 0.015 ~ 0.03Nb, 0.018 ~ 0.15Ti, ≥0.035Als, 0.0012 ~ 0.0030B, ≤0.008N, ≤0.0003H, ≤0.003O) 32 mm 板。900 °C 淬火 + 200 °C 回火后, 该钢组织为回火马氏体; 抗拉强度 1 150 ~ 1 182 MPa, 延伸率 15% ~ 17.5%; 冲击功 150 ~ 226 J; 表面 HBW 布氏硬度值 385 ~ 402; 冷弯直径为 32 mm, 冷弯角度 45°、90°、150° 和 180° 冷弯试验全部合格; 采用 GM120 焊丝焊接后, 焊接接头抗拉强度为 1 052 MPa, 焊缝冲击功为 58 ~ 63 J, 焊缝 HV 硬度值 390 ~ 396。

**关键词** NM360 钢 振轮 焊接性 冷弯性

## Development of High Quality NM360 Wear-Resistant Steel for Vibration Wheel of Roller

Yao Zhou<sup>1</sup>, Liu Hongyan<sup>1,2</sup>, Deng Xiangtao<sup>2</sup>, Yu Guangyuan<sup>1</sup> and Xu Wei<sup>1</sup>

(1 Technical Center of HBIS Group Han Steel, Handan 056000;

2 State key laboratory of Rolling Technology and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819)

**Abstract** The wear-resistant steel NM360 (C: 0.10 ~ 0.15C, 0.50 ~ 1.50Mn, ≤0.001P, ≤0.008S, 0.20 ~ 0.50Mo, 0.015 ~ 0.03Nb, 0.018 ~ 0.15Ti, ≥0.035Als, 0.0012 ~ 0.0030B, ≤0.008N, ≤0.0003H, ≤0.003O) 32 mm plate for vibration wheel of roller are designed and developed. After quenching at 900 °C + tempering at 200 °C, the structure of steel is tempered martensite with tensile strength 1 150 ~ 1 182 MPa, elongation 15% ~ 17.5%; impact energy 150 ~ 226 J; surface HBW brinell hardness value 385 ~ 402. With cold bending diameter 32 mm, and bending center angles 45°, 90°, 150° and 180°, the bending test is all qualified. After welding with GM120 welding wire, the tensile strength of the welded joint is 1 052 MPa, the impact energy of the weld is 58 ~ 63 J, and the HV hardness value of the weld is 390 ~ 396.

**Material Index** NM360 Steel, Vibration Wheel, Weld-Ability, Cold Bending Performance

压路机振轮目前主要采用 Q355 低合金钢板辊压圈圆焊接后成型, 在实际的使用过程中存在强度偏低、使用过程易变形、耐磨性差、使用寿命短等问题。工程机械制造商使用耐磨钢进行压路机振轮制造, 需要耐磨钢具有良好的耐磨性、冷弯性能和焊接性能, 同时又要具备一定的强韧性。本试验在普通钢 C-Mn 低合金钢的基础上, 采用少量 Ti、Cr、Mo、B 等元素合金化处理, 通过组织性能调控, 开发出具有高强度、高硬度、优异焊接性能和良好低温冲击韧性的低合金高强度耐磨钢板。

### 1 开发方案

#### 1.1 工艺流程和性能要求

NM360 钢的工艺流程为: 铁水预处理-100 t 转炉-LF-RH-260 mm 板坯连铸-堆垛缓冷-加热炉-轧制-矫直-精整-淬火-回火。NM360 钢的性能要求如表 1 所示。

#### 1.2 成分设计

表 1 NM360 钢的性能要求

Table 1 Performance requirements for NM360 steel

板厚/ mm	抗拉强度/ MPa	延伸率/ %	HBW 硬度值	-20 °C (纵向, V 型) 冲击功/J	冷弯性能 B = 35 mm, d = 32 mm, 90°
32	≥1 100	≥11	330 ~ 410	均值 ≥ 80 单值 ≥ 60	完好

根据合金元素的作用<sup>[1-5]</sup>对压路机振轮用耐磨钢进行成分设计。振轮用耐磨钢对焊接性和韧性要求高于普通耐磨钢, 因此 C 含量低于普通耐磨钢, C 含量设计为 0.10% ~ 0.15%。

钢中 Ti 含量控制为 ≤0.15%, N、O 和 H 含量分别 ≤0.008 0%、≤0.003 0% 和 ≤0.000 3% (表 2)。

#### 1.3 冶炼方案

(1) 铁水预处理: 为了降低入转炉前铁水硫含量, 利用钝化镁粉进行深脱硫处理并扒渣干净。

(2) 100 t 转炉冶炼: 转炉优质废钢加入量不大于 5 t/炉, 炉口微正压、全程吹氩模式冶炼, 采用双渣模式冶炼, 低温出钢保证终点 P 含量小于 0.010%, 出钢过程中采用铝块、电解锰铁、铌铁等脱氧合金

表2 试验钢 NM360 的化学成分 / %  
Table 2 Chemical composition of test steel NM360 / %

C	Mn	P	S	Cr	B	Ti	Als	Nb	Mo	N	H	O
0.10 ~ 0.15	0.50 ~ 1.50	≤ 0.010	≤ 0.008	0.30 ~ 0.80	0.001 2 ~ 0.003 0	0.02 ~ 0.15	≥ 0.035	0.015 ~ 0.030	0.20 ~ 0.50	≤ 0.008	≤ 0.000 3	≤ 0.003 0

化,采用挡渣帽、挡渣锥和滑板的“三挡渣”操作,控制出钢下渣量在 0.005% 以下,确保钢水的洁净度。(3)LF 精炼:精炼过程中通过喂入铝线和加入石灰快速脱氧造渣,升温加热同时进行 Si、Mn 等微合金调整,为保证脱硫和夹杂物去除效果,钢水处理后保证钢水中[S] ≤ 0.003%。渣碱度控制在 6 ~ 8;为减少钢水中自由氧,调整钢水中[Als] ≥ 0.040%,白渣保持 5 min 后加入钛铁,让 Ti 和 N 优先结合固 N,均匀搅拌 2 ~ 3 min 后加入硼铁,保证加入的硼铁形成酸溶硼,以提高钢的淬透性。(4)RH 精炼:RH 精炼保证真空度 100 Pa 以下,纯脱气时间 8 min 以上,出站前喂入 Ca 线,使钢中夹杂物变性处理,并保证净吹时间 ≥ 8 min,控制钢中夹杂物级别总和不超过 1.0 级。(5)260 mm 板坯连铸:连铸全程保护浇铸,钢水过热温度控制在 10 ~ 30 °C,全程恒拉速操作(0.80 ~ 0.90 m/min),通过采用合适的电磁搅拌参数和使用动态轻压下减轻铸坯内部偏析;铸坯下线后避风堆垛缓冷 24 ~ 36 h,主要目的是为了溢氢,均匀组织,减少内应力和裂纹发生率<sup>[6]</sup>。

#### 1.4 轧制方案

耐磨钢采用粗轧和精轧二阶轧制,轧制过程中控制温度和变形量,轧制钢板厚度为 32 mm。考虑加热温度对合金元素固溶和奥氏体晶粒尺寸的影响<sup>[7]</sup>,耐磨钢加热温度设计为 1 200 ~ 1 230 °C;为了充分发挥合金元素析出强化和细晶强化作用,轧制过程中粗轧单道次压下率 ≥ 12%,后三道道次压下率 ≥ 18%,以保证钢坯在再结晶区储存充分的变形能,得到细小的奥氏体组织;精轧开轧温度不超过 950 °C,避开双相区轧制,精轧变形总量大于 50%,

以促进铁素体形核,得到细小均匀的铁素体;轧制完成之后进行热矫直,矫直后快速通过冷床堆垛避风缓冷。

#### 1.5 热处理工艺

##### 1.5.1 淬火温度

选取淬火加热时间为 65 min,并对淬火温度为 850 °C、900 °C 和 950 °C 三个淬火工艺在相同冷却条件下的组织和性能进行研究,淬火后试验钢的 HBW 硬度值见表 3,金相组织如图 1 所示。850 °C 时,淬火后的组织如图 1(a) 为马氏体、铁素体和贝氏体;淬火温度为 900 °C 时,淬火后的组织如图 1(b) 主要为细小的板条马氏体;淬火温度为 950 °C 时,淬火后的组织如图 1(c) 为板条马氏体和贝氏体。淬火后的硬度结果如表 3 所示,随着淬火温度的升高,淬火后的硬度先升高后下降。这是因为淬火温度影响硼在晶界的偏聚形式,加热温度过高,硼由偏聚发展为聚集状态,影响淬透性,加热温度过低,硼的偏聚过慢,也影响淬透性<sup>[8]</sup>。因此,淬火温度为 900 °C 时奥氏体化充分,合金元素固溶量充分,淬透性良好,硬度满足标准要求。

##### 1.5.2 回火温度

淬火温度 900 °C 的试验钢进行 150、200、300、400 °C 系列回火试验,回火时间 100 min。从图 2 可

表3 试验钢淬火后 HBW 硬度值

Table 3 HBW hardness value of test steel after quenching

工艺	规格/ mm	加热温度/ °C	淬火加热 时间/min	冷却 方式	HBW 硬度值		
					1	2	3
1	32	850	65	水冷	368	371	355
2	32	900	65	水冷	400	403	395
3	32	950	65	水冷	362	372	390

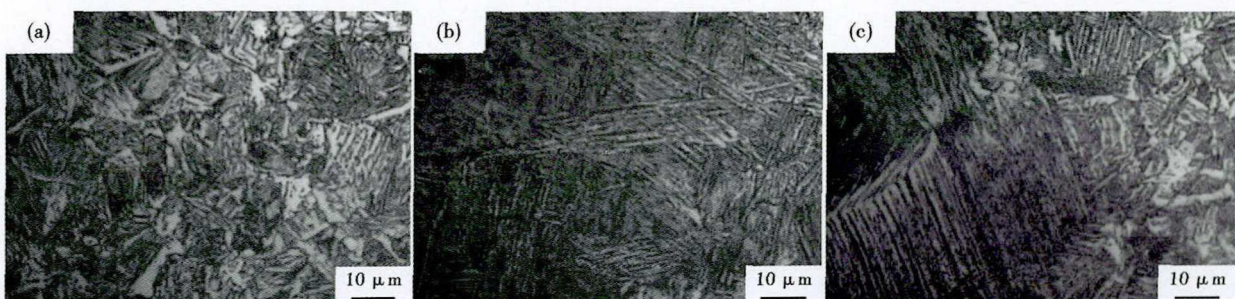


图1 850 °C (a), 900 °C (b) 和 950 °C (c) 淬火的试验钢显微组织

Fig. 1 Microstructure of test steel quenching at 850 °C (a), 900 °C (b) and 950 °C (c)

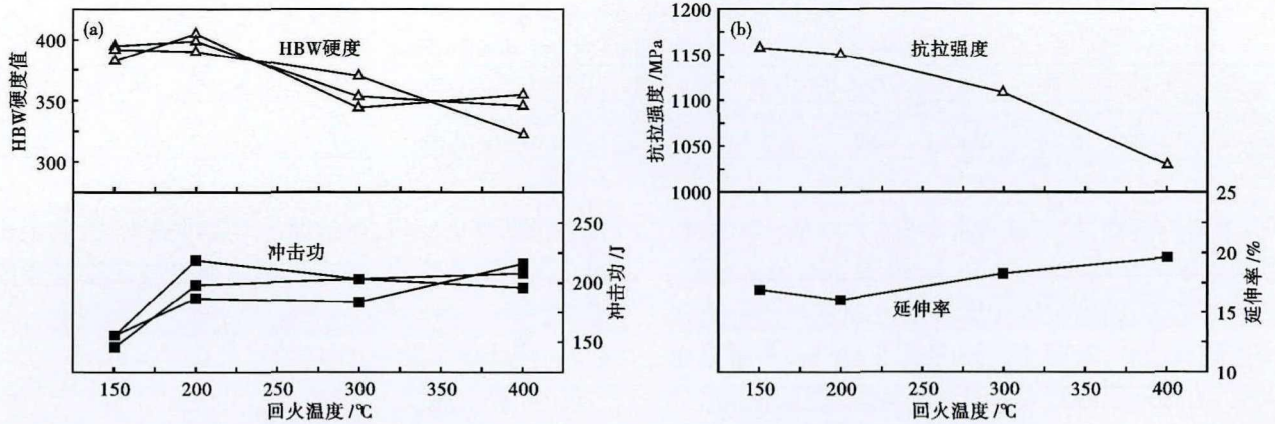


图 2 回火温度对 900 °C 淬火试验钢硬度及冲击功(a)和强度及延伸率(b)的影响

Fig. 2 Effect of tempering temperature on hardness and impact energy (a) and strength and elongation (b) of the test steel quenched at 900 °C

以看出,200 °C 低温回火时,硬度和韧性略有提升,这主要与 ε 碳化物(Fe<sub>3</sub>C)的弥散析出有关。当温度到达 300 °C 时,碳化物逐步被渗碳体所替代,随着渗碳体的进一步粗化和球化,以及铁素体的回复和等轴化,材料的硬度将继续降低<sup>[9]</sup>。400 °C 时,强度和硬度持续下降,塑性和韧性提高。这是因为组织中细小的板条马氏体开始合并,高密度位错分解,马氏体中碳含量降低,碳的固溶强化效应减弱。

不同回火温度组织如图 3 所示,150 °C 回火后组织如图 3(a)中仍然可见马氏体束和马氏体块,随着回火温度的提高,马氏体中的碳开始析出,马氏体开始变小,变短,马氏体的间距变大,甚至发生马氏体合并<sup>[9]</sup>,在 400 °C 时,回火组织如图 3(d)已经有

回火屈氏体。

## 2 试验钢力学性能

根据以上结果,试验钢的回火温度为 200 °C 时具有良好的组织和力学性能。

### 2.1 实际组织和性能检测

按照设计的冶炼、轧制和热处理工艺进行大生产,其中淬火温度为 900 °C,加热时间为 65 min,冷却方式为水冷;回火温度为 200 °C,回火时间为 100 min,冷却方式为堆垛空冷。试验钢拉伸试验按照 GB/T 228.1-2010 规定在 SHT5106P 万能试验材料机上进行;冲击试验按照 GB/T 229-2007 规定在 CBD-500 摆锤冲击试验机上进行,冲击试样位置为

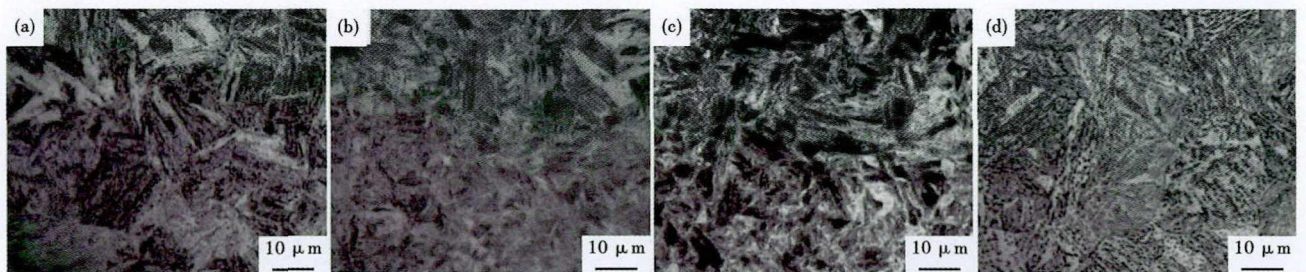


图 3 900 °C 淬火 150 °C (a), 200 °C (b), 300 °C (c) 和 400 °C (d) 回火试验钢的显微组织

Fig. 3 Microstructure of test steel quenching at 900 °C and tempering at 150 °C (a), 200 °C (b), 300 °C (c) and 400 °C (d)

钢板厚度 1/2 处,尺寸(mm)为 10 × 10 × 55,冲击温度为 -20 °C,试样缺口方向垂直于钢板表面;扫描电镜在 Sigma HD 型扫描电子显微镜检测。表 4 为实际生产中 3 批试验钢的力学性能情况,从表 4 中可以看出,产品的综合力学性能和强韧性匹配良好,抗拉强度为 1 150 ~ 1 182 MPa,延伸率为 15% ~ 17.5%,冲击功为 150 ~ 226 J,表面 HBW 硬度值为

表 4 NM360 钢 32 mm 板 900 °C 淬火,200 °C 回火后的力学性能

Table 4 Mechanical properties of NM360 steel 32 mm plate quenched at 900 °C and tempered at 200 °C

编号	规格/mm	抗拉强度/MPa	延伸率/%	-20°C V 型冲击功/J			HBW 硬度值		
1#	32	1160	15	150	190	175	385	393	390
2#	32	1150	16	170	200	198	390	395	393
3#	32	1182	17.5	210	226	195	402	385	398

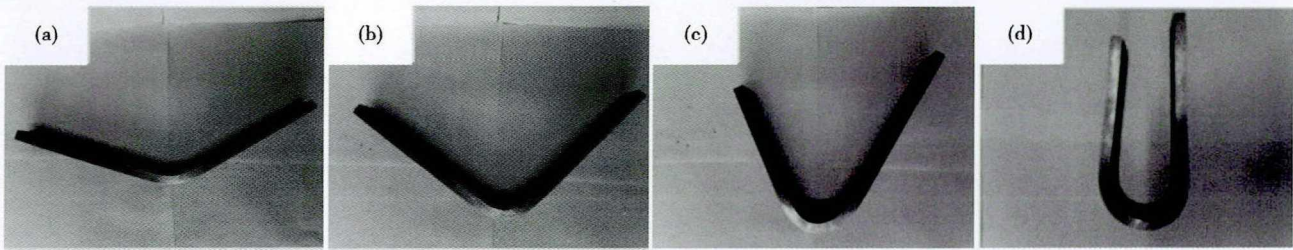


图4 NM360 钢 32 mm 板 45° (a), 90° (b), 150° (c) 和 180° (d) 冷弯试样形貌  
Fig. 4 Morphology of NM360 steel 32 mm plate cold bending with 45° (a), 90° (b), 150° (c) and 180° (d)

385~402, HBW 硬度波动值为 17。

对试验钢组织进行扫描电镜观察分析, 得出马氏体板条束细小密集, 部分板条马氏体的间距为 0.2~0.3 μm, 马氏体束的间距为 5~6 μm。在组织中发现有尺寸为 8~10 μm 的 TiN 的析出物。

## 2.2 实际冷弯性能检测

本次弯曲试验按照 GB/T232-2010 规定在型号为 BW-1168 的板坯板材弯曲试验机上进行, 采用正弯的形式, 试样宽度为 35 mm, 弯心直径为 32 mm, 弯曲角度为 45°、90°、150° 和 180°, 弯曲试样表面完好, 无裂纹、皴裂等缺陷。弯曲结果图 4 所示。

## 2.3 焊接性能检测

根据用户的使用情况, 采用 2 块 32 mm 的试验钢进行同钢种焊接, 焊丝采用奥钢联 GM120; 焊接方式为 80% CO<sub>2</sub> + 20% Ar 混合气体保护焊; 焊接电流为 240 A, 焊接电压为 27 V; 焊接速度为 35 cm/min; 道间温度为 120~150 °C, 焊接后需使用保温棉进行保温。从表 5 可以看出, 焊接后各项性能参数良好, 焊接接头强度、焊缝冲击韧性达到用户实际需求, 焊接接头抗拉强度为 1 052 MPa, 焊缝冲击功为 58~63 J, 热影响区冲击功为 101~198 J; 焊缝的 HV 硬度值为 390~396, 热影响区 HV 硬度值为 366~375。

表 5 试验钢焊接后的性能  
Table 5 Performance of test steel after welding

规格/ mm	抗拉强度/ MPa	-20 °C V 型 冲击功 / J	HV10 维氏硬度值
32	焊接接头 1052	母材: 150, 190, 175 焊缝中心: 63, 58, 60 HAZ: 101, 107, 198	母材: 385, 393, 390 焊缝: 390, 394, 396 HAZ: 375, 375, 366

## 3 结论

(1) 生产的耐磨用钢 NM360 抗拉强度为 1 150~1 182 MPa, 延伸率为 15%~17.5%, 冲击功为 150~226 J, 表面 HBW 硬度值为 385~402, HBW

硬度波动值为 17。

(2) NM360 钢采用 900 °C 淬火温度, 200 °C 回火温度时强韧性呈现最佳匹配, 得到回火马氏体组织和细小的合金析出物: 马氏体的间距为 0.2~0.3 μm, 马氏体束的间距为 5~6 μm, 合金析出物的尺寸为 5~7 μm, 因此该耐磨钢具有较高强韧性和耐磨性。

(3) NM360 钢具有良好的弯曲性能, 弯曲角度为 45°、90°、150° 和 180°, 弯头直径为 32 mm, 弯曲试样完好。

(4) NM360 钢采用奥钢联 GM120 焊材, 焊接性能良好, 焊接接头抗拉强度为 1 052 MPa, 焊缝冲击功为 58~63 J, 焊缝 HV 硬度值为 390~396。

## 参考文献

- [1] 蔡可森, 刘伟建, 霍向东. 含硼钢中硼的存在形式及控制研究[J]. 炼钢, 2015, 31(3): 45-49.
- [2] 韩赞, 邝霜. N 含量对 Ti 微合金化低碳马氏体钢力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(10): 36-39.
- [3] 赵伟. 一种钛微合金化耐磨钢的析出控制及耐磨机理研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- [4] 管彦朋. B-HARD360CFA 耐磨钢 GMAW 接头裂纹及显微组织研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [5] 巨彪. NM600 级超高强耐磨钢组织调控技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2016.
- [6] 杨慧贤, 杨昊, 刘洁, 等. 堆垛缓冷过程模拟及对钢板性能的影响[J]. 河北冶金, 2016(1): 28-31.
- [7] 罗许, 康永林, 李俊洪. 加热温度对钛微合金化钢奥氏体晶粒长大的影响[C]// 2015 第二届钒钛微合金化高强度钢开发应用技术交流会议论文集. 2015.
- [8] 张逊, 曹艺, 王昭东, 等. 奥氏体化温度对微硼耐磨钢组织性能的影响[J]. 材料与冶金学报, 2013, 12(1): 62-66.
- [9] 曹艺. NM400 级低合金高强度耐磨钢的开发及其组织性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.

姚宙(1986-), 男, 硕士生(武汉科技大学), 高级工程师, 2009 年太原理工大学(本科)毕业, 低合金耐磨产品研发和应用. E-mail: yaozhou@hbisco.com

收稿日期: 2020-08-17