

高品质自卸车厢体用 NM450 耐磨钢板的开发

张卫攀 刘红艳 徐桂喜 王青云 孙电强
(河钢集团邯郸公司技术中心, 邯郸 056000)

摘要 采用 Nb、Ti、Cr、B 微合金化成分, 设计和开发了高品质自卸车厢体用 0.20% ~ 0.25% C 耐磨钢 NM450。该钢 14 mm 板 900 °C 淬火 200 °C 回火的组织为回火板条马氏体, 并有少量弥散分布的第二相粒子, 具有良好的综合性能。NM450 钢抗拉强度 1 459 MPa, 延伸率 19%, 冲击功 104 J, 表面硬度值 450HBW。在弯曲角度为 180°, 弯头直径为 168 mm 条件下, 弯曲试样合格。采用 CHW-70C 焊丝, 焊接性能良好, 焊接接头抗拉强度 839 MPa, 焊缝冲击功 113 J, 焊缝硬度值 282HV, 在弯曲角度为 90°, 弯头直径为 168 mm 条件下, 弯曲试样合格。

关键词 自卸车厢体 耐磨钢 NM450 回火马氏体 冷弯 焊接性能

Development of High Quality NM450 Wear-Resistant Steel Plate for Box Body of Self Discharge Truck

ZHANG Wei-pan, LIU Hong-yan, XU Gui-xi, WANG Qing-yun, SUN Dian-qiang
(Technical Center of HBIS Group Han Steel Co, Handan 056000)

Abstract The 0.20% ~ 0.25% C high-quality NM450 wear-resistant steel for truck compartment has been designed and developed by using Nb, Ti, Cr and B microalloying composition. The microstructure of 14 mm steel plate quenched at 900 °C and tempered at 200 °C is tempered lath martensite and a small amount of dispersed second phase particles, which has the excellent comprehensive properties. The tensile strength of NM450 steel is 1 459 MPa, the elongation is 19%, the impact energy is 104 J, the surface brinell hardness value is 450HBW. With the bending angle 180° and the elbow diameter 168 mm, the bending sample is qualified. CHW-70C welding wire has good welding performance; i. e. the tensile strength of welded joint 839 MPa, the impact energy of weld 113 J, the hardness number of weld 282HV. With the bending angle 90° and the elbow diameter 168 mm, the bending sample is qualified.

Material Index Box Body of Self Discharge Truck, Wear-resistant Steel NM450, Tempered Martensite, Cold bending, Weldability

随着社会对节能环保要求的日益严苛, 自卸车轻量化发展已成为共识^[1-3], 其厢体材质也由普碳钢 Q355 逐步被耐磨钢 NM400 所替代, 随着材质厚度的降低, 车辆省油 25% ~ 37%, 降低了燃油消耗以及二 O 化碳的排放, 同时装入量和使用寿命得到提升。耐磨钢 NM450 与 NM400 钢相比, 强度更高, 耐磨性更好, 厢体更薄更轻, 自卸车得到了进一步轻量化, 更符合长寿命低碳环保的发展理念^[4-5]。此外, 为减少焊接道次和提高加工效率, 自卸车行业对良好冷弯性能的耐磨钢有了更为迫切的需求^[6]。

1 开发设计思路

1.1 化学成分设计

为了获得良好的综合性能, 根据合金元素的不

同作用^[7-9], NM450 钢采用了 Nb、Ti、Cr、B 多元素微合金化的成分设计, 具体成分如表 1 所示。

1.2 生产工艺设计

NM450 钢生产工艺路线为: 铁水预处理-100 t 转炉初炼-LF 精炼-RH 精炼-260 mm 板坯连铸-堆垛缓冷-加热炉-粗轧-精轧-冷却-矫直-精整-淬火-回火-入库。

1.3 性能要求

NM450 钢用于自卸车厢体, 其性能应兼具强度和韧性, 具体性能要求见表 2 所示。

2 耐磨钢 NM450 关键技术开发

2.1 钢水冶炼工艺

2.1.1 钢水脱 P

表 1 NM450 钢化学成分 / %
Table 1 Chemical compositions of NM450 steel / %

C	Si	Mn	P	S	Als	Nb	Ti	Cr	B	N	H	O
0.20 ~ 0.25	0.10 ~ 0.25	1.20 ~ 1.35	≤ 0.012	≤ 0.003	0.030 ~ 0.055	0.015 ~ 0.035	0.010 ~ 0.030	0.55 ~ 0.75	0.001 5 ~ 0.003 5	≤ 0.004 5	≤ 0.000 2	≤ 0.003 0

表 2 NM450 钢性能要求

Table 2 Performance requirements for NM450 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 (D=12 a, 180°)
5~20	≥1 250	≥7	420~480	≥24	表面完好

表 3 转炉炉渣组成

Table 3 Ingredient of converter slag

渣组成 /%						碱度 (R)
SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	TFe	
10.85~ 12.15	50.05~ 52.55	6.32~ 7.15	2.05~ 2.75	3.15~ 3.35	12.35~ 14.10	4.32~ 4.61

转炉是关键脱 P 环节,在冶炼前期快速造渣,控制炉渣碱度(R)在 4.32~4.61(表 3),保证了转炉终点 P 含量控制在 0.008% 以下。为保证脱除效率采用了全程底吹氩冶炼模式。为避免下渣,出钢过程采用下渣检测装置,挡渣操作采用滑板快速挡渣,减少后续工序的回 P。

2.1.2 钢水脱 S

(1) 铁水预处理:通过喷吹钝化镁粉颗粒,进行深脱 S 处理。出站前利用扒渣机进行扒渣操作,保证捞渣率 ≥95%,一般经此工序,钢水中 S 含量能控制在 0.003% 以下。(2) LF 精炼:也是重要的脱 S 环节,造好还原渣是控制的关键。生产中采用白渣脱 S 工艺,根据来钢的钢水温度和成分条件,控制炉渣碱度 5.48~6.19,确保出站钢水 S 含量 ≤0.002%。精炼渣组分见表 4。

2.1.3 N、H、O 的控制

(1) N 的控制:转炉工序优化造渣制度,避免钢水裸露,出钢后要及时加入造渣剂;LF 精炼前期要快速脱氧造渣,电极要埋好弧并减少升温次数;RH 精炼是主要的去 N 环节,在较高的真空度下,促使 N 扩散上浮排出;连铸全工序采用保护浇铸。成品 N 含量最终控制在 45×10^{-6} 以下。(2) H 的控制:微量的 H 会在铸坯中心偏析或者夹杂物处富集,产生微裂纹,最终导致钢板各种性能不合。耐磨钢采用 Nb、Ti、Cr 等多合金复合加入的成分体系,铸坯易产生偏析,H 致裂纹敏感性更强。控 H 要保证添加料、钢包和中间包内衬的干燥,RH 精炼是主要的去

表 4 精炼炉渣组分

Table 4 Ingredient of refining slag

渣组分 /%						碱度 (R)
SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	TFe	
8.84~ 10.83	54.78~ 59.38	8.05~ 9.15	15.32~ 21.56	0.21~ 0.58	0.40~ 0.62	5.48~ 6.19

H 工序,经过真空处理钢水的 H 含量能够控制在 2×10^{-6} 以下。(3) O 的控制:钢中 O 指的是 T[O],这代表了钢水的洁净度水平,需要在冶炼的全流程进行控制。转炉过程要避免后吹,在 LF 精炼环节,通过加入铝线进行深度脱氧,钢水的 O 含量能够控制在 30×10^{-6} 以下。

2.1.4 板坯铸坯生产

铸坯的内部质量为产品性能奠定重要基础,铸坯的中心偏析和中心疏松对产品各项性能有重大影响。在连铸生产中要合理匹配各项工艺,其中钢水过热度 10~25 °C,拉速 0.80~0.90 m/min,二冷比水量为 0.30~0.40 L/kg,并采用电磁搅拌(电流 200~400 A,频率 3~6 Hz)和动态轻压下(凝固末端的 6、7 和 8 扇形段各压下 2~3 mm)联合技术,大幅度提升了铸坯内部质量。对铸坯进行低倍评级,中心 C 偏析可以达到 0.5,中心疏松为 0.5 水平。

2.2 轧制工艺

为防止奥氏体晶粒长大,在板坯再加热过程中采用低温加热和均热工艺,温度控制在 1 100~1 160 °C,以细化奥氏体晶粒。

轧制采用双轧程控温工艺,粗轧区第一轧程对板坯的单道次压下量 ≥17%,使钢板高温时发生充分再结晶,得到细小的初始奥氏体晶粒组织。随后的精轧区第二轧程对中间坯施加适当的未再结晶累积压下率,终轧温度 850~910 °C。轧后冷却采用空冷工艺,禁止水冷(表 5)。

2.3 热处理工艺

NM450 钢 14 mm 板淬、回火工艺见表 6。

(1) 淬火:轧制好的钢板冷却至室温后,抛丸去除表面氧化铁皮,进行热处理生产。当加热温度达到 850 °C 即 Ac₃ 温度点时,钢板组织充分奥氏体化,耐磨钢 NM450 在生产中一般奥氏体化温度在 850~950 °C。在淬火生产中,对于 14 mm 厚度的 NM450 钢板淬火加热温度为 890~910 °C,保温时间为 30~40 min,通过淬火水冷,板形平直度测量仪显示淬火后板形平直度 1~5 mm/通宽,板形和表面控制良好(图 1)。

(2) 回火:回火温度的精确性控制是保证钢板通板力学性能均匀性、板形平直度的关键。在回火生产中使用了烟气循环式热处理炉,采用“烧嘴明火+循环热风”混合的强对流加热方式,避免钢板局部过热,实现板温均匀性在 ±5 °C 以内。在实际生产中,回火保温温度为 190~200 °C,保温时间为

表 5 NM450 钢关键轧制工艺
Table 5 Key rolling process of NM450 steel

厚度/ mm	加热温度/ ℃	一轧程道次 压下率/%	待温厚度/ mm	二轧开轧 温度/℃	二轧程道次 压下率/%	终轧温度/ ℃	冷却
14	1 100 ~ 1 160	17.15 ~ 25.35	35 ~ 45	915 ~ 985	16.15 ~ 23.25	850 ~ 910	空冷禁止水冷

表 6 NM450 钢板热处理工艺
Table 6 Heat treatment process of NM450 steel plate

厚度/ mm	淬火			回火		
	温度/ ℃	时间/ min	冷却 方式	温度/ ℃	时间/ min	冷却 方式
14	890 ~ 910	30 ~ 40	水冷	190 ~ 200	35 ~ 45	空冷



图 1 NM450 钢淬火后板形
Fig. 1 Plate shape of NM450 steel after quenching

35 ~ 45 min, 随后空冷至室温, 保持钢板的高硬度和耐磨性, 同时再次降低淬火残余内应力, 提升成型过程整板变形的均匀性。

3 耐磨钢 NM450 的微观组织分析及力学性能

3.1 微观组织分析

图 2 为厚度规格为 14 mm 的 NM450 钢的微观组织为回火马氏体。板条马氏体组织细小, 且为多方位交错出现, 细小碳化物弥散分布在板条内部和板条之间。在回火马氏体基体上存在少量的第二相粒子, 主要是 Ti(C, N) 和 Nb(C, N), 由于 Ti 和 Nb 的碳 N 化物均为 NaCl 晶型, 所以可以互溶形成复合的碳 N 化物^[10]。第二相粒子通过控制轧制和热处理相结合, 分布较为弥散, 其粒子细小, 一般为 1 ~ 5 μm, 形状近似圆形或方形。磨损过程中, 第二相粒子由于自身的超高硬度, 可以抵抗磨料嵌入材料基体并且阻碍磨料的相对运动, 从而降低了磨损失重, 增加了耐磨性能; 由于耐磨钢 NM450 韧性相对较好, 可以阻止磨损过程中的裂纹扩展, 防止磨

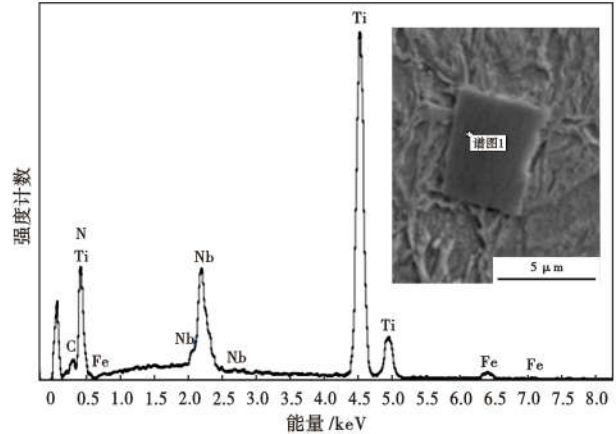


图 2 14 mm NM450 钢板 900 °C 淬火, 200 °C 回火的微观组织和 (Ti, Nb)(C, N)

Fig. 2 Microstructure and (Ti, Nb)(C, N) of NM450 steel 14 mm plate quenched at 900 °C and tempered at 200 °C

屑的剥落, 在一定程度上也有利于减少磨损, 增加耐磨性能。此外第二相粒子在钢中有很强强化作用, 可以钉扎奥氏体晶界和细化晶粒的作用, 在钢的生产中第二相粒子具有重要的意义^[11-12]。NM450 钢的微观组织使钢板兼具了高强度、高耐磨性和高韧性的优异综合性能。

3.2 常规力学性能

经过检测, 表面硬度值为 450HBW, -20 °C 低温冲击功为 104 J, 抗拉强度为 1 459 MPa, 延伸率为 19%。从表 7 检测数据可以看出, NM450 钢具有良好的低温韧性, 较高的强度和硬度, 同时常温延伸性能良好, 可以实现常温加工和折弯变形等复杂成型, 具有良好的综合力学性能, 均能满足用户性能指标和使用要求。

3.3 断口分析

图 3 为典型冲击韧性断口, 纤维断口区域面积较大, 发生了较大的塑性变形, 没有明显的裂纹及夹杂物。从微观上看断口处韧窝较深且分布均匀, 少量韧窝处存在细小的夹杂物颗粒, 最大尺寸在 4 μm 左右, 经能谱分析, 细小的夹杂物多为 S 化物夹杂和

表 7 NM450 钢板性能
Table 7 Properties of NM450 steel plate

厚度/ mm	抗拉强 度/MPa	伸长率 (A ₅₀)/%	-20 °C V 型 冲击功/J	HBW 表面 硬度值	冷弯性能 (D = 12a, 180°)
14	1 459	19	104	450	表面完好

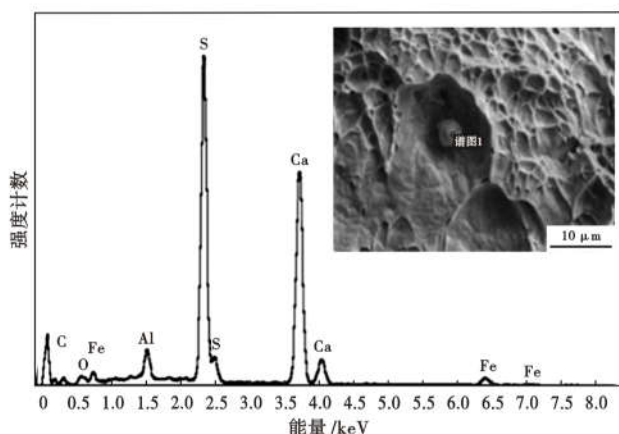


图3 NM450 钢冲击断口形貌和夹杂物分析

Fig.3 Impact fracture morphology of NM450 steel and inclusion analysis

O 化物夹杂。冲击韧性断口形貌体现出耐磨钢较高的韧性性能。

3.3 焊接性能

根据用户的使用情况,采用 2 块 14 mm 的试验钢板进行同钢种焊接,焊丝采用自贡大西洋焊丝 CHW-70C($\Phi 1.2$ mm);焊接方式为 80% Ar + 20% CO₂ 混合气体保护焊;焊接电流为 230 A,焊接电压为 27 V;焊接速度为 35 cm/min;道间温度为 100 ~ 150 °C,焊接后需使用石棉布缓冷。从表 8、表 9、表 10 可以看出,焊接后各项性能参数良好,焊接接头强度、焊缝冲击韧性满足了用户实际需求,焊接接头

表 8 NM450 钢板对接接头拉伸及冷弯试验结果

Table 8 Tensile and cold bending test results of butt joint of NM450 steel plate

厚度/mm	抗拉强度(R_m)/MPa	正弯, $d=12a,90^\circ$
14	839	完好

参考文献

- [1] 韩妮丹,赵阳,董现春,等. 矿用自卸车车厢轻量化与有限元模拟[J]. 机械工程与自动化, 2018, (3):77-78,83.
- [2] 郭珊珊. 自卸车车体轻量化设计[D]. 西安:陕西科技大学, 2019.
- [3] 董志明,郭海全,潘艳君,等. 矿用自卸车车厢力学性能研究[J]. 中国矿业, 2017,26(7):159-163.
- [4] 陈林恒,黄龙,杨柳,等. 低合金耐磨钢板 NM450 焊接性能研究[J]. 宽厚板, 2017,23(6):13-17.
- [5] 黄军,李经涛,吴建鹏,等. 热处理工艺对厚规格 NM450 耐磨钢板组织和性能的影响[J]. 河南冶金, 2021,29(1):19-23.
- [6] 谢世正,刘宁,梁亮,等. NM450 钢板折弯开裂原因分析[J]. 中国冶金, 2021,31(7):46-49.
- [7] 刘红艳,王召东,吕德文,等. 具有良好强韧性高等级耐磨钢 NMS00 生产工艺开发及应用[C]//第十二届中国钢铁年会论文集, 2019 年.
- [8] 姚宙,刘红艳,邓想涛,等. 高品质压路机振轮用耐磨钢 NM360 的开发[J]. 特殊钢, 2021,42(2):24-27.

表 9 NM450 钢板对接接头冲击试验结果

Table 9 Impact test results of butt joint of NM450 steel plate

试验温度 (T)/°C	K_{V2} 冲击功 /J		
	母材	焊缝中心	熔合线
-20	104	113	190

表 10 NM450 钢板对接接头 HV10 维氏硬度值

Table 10 HV10 vickers hardness number of butt joint of NM450 steel plate

母材	HAZ	焊缝	HAZ	母材
460	439	282	428	458

抗拉强度为 839 MPa,焊缝冲击功为 113 J;焊缝的硬度值为 282HV,热影响区硬度值为 428HV。

4 结论

(1)采用 Nb、Ti、Cr、B 微合金化成分,设计和开发了 14 mm 耐磨钢 NM450,其抗拉强度为 1 459 MPa,延伸率为 19%,冲击功为 104 J,表面硬度值为 450HBW,弯曲角度为 180°,弯头直径为 168 mm,弯曲试样完好。

(2)NM450 钢微观组织为回火板条马氏体,组织细小,且为多方位交错出现,细小碳化物弥散分布在板条内部和板条之间,基体上存在少量的第二相粒子,主要是 Ti(C,N)和 Nb(C,N)。其微观组织使钢板兼具了高强度、高耐磨性和高韧性的优异综合性能。

(3)NM450 钢采用 CHW-70C 焊丝,焊接性能良好,焊接接头抗拉强度为 839 MPa,焊缝冲击功为 113 J,焊缝硬度值为 282HV,弯曲角度为 90°,弯头直径为 168 mm,弯曲试样完好。

- [9] 郑健,温长飞,黄龙,等. 低合金高强度耐磨钢板 NM500 的研发[J]. 金属热处理, 2019,44(3):42-46.
- [10] 刘伟建,李晶,霍向东. 高强度低合金耐磨钢 NM400 的强韧化机制[J]. 钢铁研究学报, 2014,26(7):77-82.
- [11] 曹艺,王召东,吴迪,等. NM400 高强度低合金耐磨钢的组织与性能[J]. 东北大学学报, 2011,32(2):241-244.
- [12] 邓想涛,王召东,黄龙,等. 连铸坯内生超硬 TiC 超级耐磨钢的研究与应用[J]. 轧钢, 2019,36(6):6-10.

张卫攀(1986-),男,硕士(2014 年华北理工大学),工程师,2010 年河北理工大学(本科)毕业,热轧板新产品开发。

E-mail: zhangweipan25@163.com

收稿日期:2021-09-06