

## 镍含量对国产化高铁车轴钢组织和性能的影响

王之香 高建兵 王玉玲 王育田 张锦文  
(山西太钢不锈钢股份有限公司技术中心,太原 030003)

**摘要** 采用金相显微镜(Metallographic)和扫描电镜(SEM)等研究了 0.20%、0.80% 和 1.20% Ni 高铁车轴钢 DZ1 和 DZ2 性能和组织结构。结果表明,随着 Ni 含量由 0.20% 增至 1.20%,钢的抗拉强度由 710 MPa 提高到 759 MPa、屈服强度由 535 MPa 提高到 608 MPa;钢的 20 ℃ 和 -40 ℃ 冲击韧性均得到提升,特别是 -40 ℃ 横向冲击韧性从 0.20% Ni 的 87 J 提高到 1.20% Ni 的 136 J, -40 ℃ 纵向冲击功从 94 J 提高到 179 J;钢的韧脆转变温度由 -30 ℃ 降低到 -100 ℃;3 种成分的高铁车轴钢均可得到贝氏体+回火马氏体组织,贝氏体量随着镍含量的提高而增加,并且镍含量提高后钢的组织更加细小、均匀。

**关键词** 高铁 车轴钢 Ni 含量 韧脆转变温度 贝氏体+回火马氏体

### Effect of Nickel Content on Microstructure and Properties of Domestic High-Speed Railway Axle Steel

Wang Zhixiang, Gao Jianbing, Wang Yuling, Wang Yutian and Zhang Jinwen  
(Technology Center, Shangxi Taigang Stainless Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

**Abstract** The properties and microstructure of high-speed axle steel DZ1 and DZ2 with Ni contents 0.20%, 0.80% and 1.20% are studied by using metallographic microscope and SEM etc. The results show that with Ni content increasing from 0.20% to 1.20%, the tensile strength and yield strength of the steel increases respectively from 710 MPa to 759 MPa and from 535 MPa to 608 MPa; the impact toughness of steel at 20 ℃ and -40 ℃ impact toughness is improved, especially at -40 ℃, the transverse impact energy of steel increases from 87 J of 0.20% Ni contents to 136 J of 1.20% Ni contents and the longitudinal impact energy of steel increases from 94 J to 179 J; the temperature of steel's tough-brittle transition decreases from -30 ℃ to -100 ℃. The high-speed railway axle steel structure of 3 kinds of composition is Bainite + tempered martensite structure, and the bainite volume increases with the increase of Ni content, and steel microstructure became finer and more uniform after the increase of Ni content.

**Material Index** High-Speed Railway, Axle Steel, Nickel Content, Temperature of steel's Tough-Brittle Transition, Bainite + Tempered Martensite

我国成功研发出了具有自主知识产权的适用于时速 200 ~ 250 km/h 的 DZ1 高铁车轴钢、时速 ≥ 350 km/h 的 DZ2 高铁车轴钢<sup>[1]</sup>,并由中国铁路总公司制定了自己的国产化标准 Q/CR639-2018《动车组车轴》,标准规定的 DZ1、DZ2 高铁车轴钢成分、性能要求见表 1、表 2。国产化高铁车轴材料相关技术指标要求设计高于进口材料要求,主要是在进口常温冲击性能外增加了 -40 ℃ 纵向冲击性能 ≥ 30 J、横向冲击性能 ≥ 25 J 的要求,使车轴性能具有更好的低温适应性。

国产化高铁车轴钢的设计思路是通过加入更高含量的 Ni 元素来提高高铁车轴钢的韧性<sup>[2]</sup>;镍是非碳化物形成元素,可与 Fe 以互溶的形式存在于钢中的 α 相或 γ 相中,使之固溶强化,并通过细化 α 相的晶粒,改善钢的低温性能(特别是低温韧

性)和耐疲劳性能,和 Cr 配合使用时,可显著提高钢的淬透性和耐腐蚀性<sup>[3]</sup>。

#### 1 国产化高铁车轴钢成分及力学性能技术要求

化学成分要求见表 1<sup>[4]</sup>。

样坯应经过“正火+淬火+回火”热处理后,进行力学性能检验。力学性能试样取样位置按照图 1 取试样。力学性能值应符合表 2。

DZ1 车轴样坯晶粒度级别不应低于 6 级,且最高与最低级别差不超过 3 级;组织为贝氏体+马氏体回火组织,可少量存在铁素体。

表 1 国产化高铁车轴钢化学成分控制要求/%

Table 1 Chemical composition of domestic High-speed Railway Axle Steel control requirement / %

钢号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Al	Cu
DZ1	0.22 ~ 0.29	0.17 ~ 0.37	0.60 ~ 0.80	≤ 0.015	≤ 0.010	0.95 ~ 1.20	0.20 ~ 0.30	0.15 ~ 0.30	0.02 ~ 0.06	0.010 ~ 0.040	≤ 0.20
	0.24 ~ 0.32	0.20 ~ 0.40	0.60 ~ 0.90	≤ 0.010	≤ 0.010	0.90 ~ 1.20	0.20 ~ 0.30	0.50 ~ 1.50	≤ 0.06	0.010 ~ 0.040	≤ 0.20

DZ2 车轴样坯晶粒度级别不应低于 7 级,且最高与最低级别差不超过 3 级;组织为贝氏体 + 马氏体的回火组织。

## 2 试验钢及方法

### 2.1 试验钢

在符合 Q/CR639-2018《动车组车轴》标准要求的基础上,设计了 1 种 DZ1 试验钢,2 种 DZ2 试验钢,设计的这 3 种试验钢主要是镍含量的不同,为便于直观体现 3 种试验钢的不同,本文以 0.20% Ni、0.80% Ni 和 1.20% Ni 作为试验钢进行研究分析。

本研究采用 250 mm × 250 mm 的方坯,对应的成分见表 3,其制造工艺流程如下:80 t EBT 电弧炉冶炼→80 t LF 精炼→80 t VD 真空脱气处理→连铸 Φ690 mm 铸坯→初轧机轧制成 250 mm × 250 mm 方钢→退火→精整、检验、交货。

### 2.2 试验方法

在相当于钢锭头部的 250 mm × 250 mm 方钢上锯切截面尺寸为 200 mm × 200 mm、长度为 200 mm 的样坯,采用箱式电阻炉对试样进行 900 °C 正火 + 880 °C 淬火 + 650 °C 回火热处理工艺,淬火介质为水。把调质热处理后的试样按照图 1 所示位置进行取样。拉伸试样尺寸直径  $D = 10$  mm,标距  $L_0 = 50$  mm;冲击试样尺寸(mm)  $10 \times 10 \times 55$ 。按照 GB/T 228.1-2010《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》对车轴钢坯进行常温力学性能检测。根据 GB/T 229-2009《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》进行 20 °C 冲击试验、-40 °C 冲击试验,20 °C 冲击试验试样刻槽深度为 5 mm 深“U”型,-40 °C 冲击试验试样刻槽深度为 2 mm 深“U”型;钢的韧脆转变试验采用的冲击试验试样刻槽深度为 2 mm 深“U”型。采用 Cambridge S-360 型扫描电子显微镜(SEM)观察分析冲击断口;金相试样尺寸(mm)  $20 \times 20 \times 20$ ,对 3 种高铁车轴钢热处理后的金相试样表面抛光,用硝酸酒精腐蚀,通过 LEICA-DMR 光学

表 2 国产化高铁车轴钢力学性能要求

Table 2 Requirement of mechanical properties of domestic High-speed Railway Axle Steel

钢号	$R_m$ / MPa	$R_{eH}$ / MPa	$A$ / %	20 °C 纵向, $K_{U2}$ /J	20 °C 横向, $K_{U2}$ /J	-40 °C 纵向, $K_{U2}$ /J	-40 °C 横向, $K_{U2}$ /J
DZ1	650 ~ 800	≥420	≥18	≥50	≥25	≥25	≥20
DZ2	680 ~ 850	≥450	≥18	≥50	≥25	≥30	≥25

注:20 °C 冲击功缺口深度 5 mm; -40 °C 冲击功缺口深度 2 mm。

表 3 3 种试验钢的化学成分 / %

Table 3 Chemical composition of 3 test steels / %

试验钢	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	V	Mo	Al	[H]	[O]
0.20% Ni	0.25	0.22	0.65	0.004	0.001	1.03	0.20	0.04	0.26	0.025	0.000 07	0.001 0
0.80% Ni	0.26	0.24	0.62	0.004	0.001	1.00	0.80	0.04	0.26	0.022	0.000 06	0.000 9
1.20% Ni	0.25	0.25	0.65	0.004	0.001	1.00	1.20	0.04	0.26	0.024	0.000 08	0.000 9

显微镜观察其组织<sup>[5]</sup>。

## 3 试验结果及其讨论

### 3.1 3 种国产化高铁车轴钢拉伸性能

3 种国产化高铁车轴钢经过相同热处理,其拉伸性能变化见图 2,从图 2 中可看出,3 种成分的试验钢随着 Ni 含量的提高,抗拉与屈服强度逐渐提高,

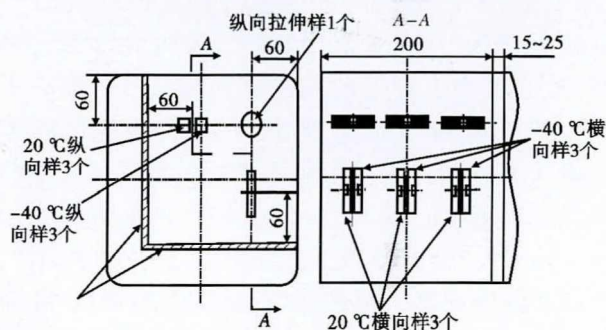


图 1 力学性能试样取样位置

Fig. 1 Sampling location for samples of mechanical properties

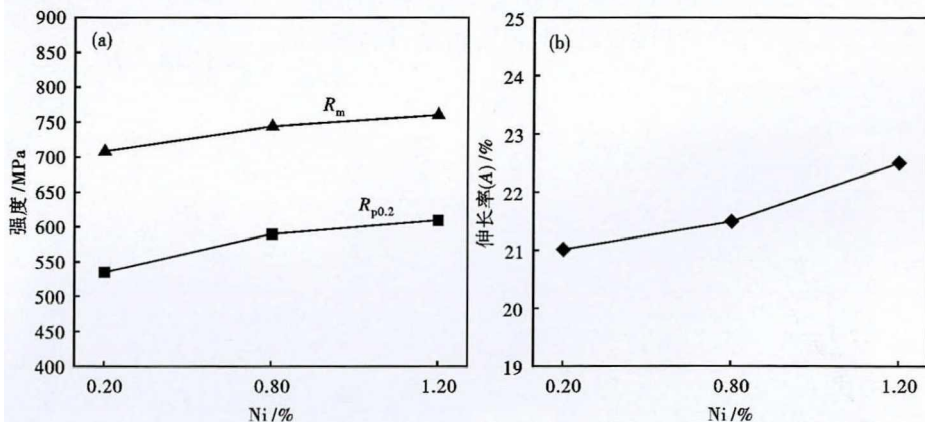


图 2 Ni 含量对试验高铁车轴钢力学性能的影响:(a)强度;(b)伸长率

Fig. 2 Effect of Ni content on mechanical properties of test high-speed railway axles steel: (a) strength; (b) elongation

抗拉强度由 710 MPa 提高到 759 MPa, 屈服强度由 535 MPa 提高到 608 MPa, 延伸率提高不明显, 呈上升的趋势。

### 3.2 3 种国产化高铁车轴钢冲击韧性性能

3 种国产化高铁车轴钢经过 900 °C 正火 + 880 °C 淬火 + 650 °C 回火、淬火介质为水的相同热处理工艺, 20 °C 冲击试验试样刻槽深度为 5 mm 深“U”型、-40 °C 冲击试验试样刻槽深度为 2 mm 深“U”型, 其 20 °C 与 -40 °C 横

向、纵向冲击性能变化见图 3, 从图 3 中可看出, 3 种成分的材料, 当 Ni 含量从 0.2% 提高到 1.20% 后, 20 °C 与 -40 °C 冲击功均随着 Ni 含量的提高, 横向、纵向冲击功逐渐提高, -40 °C 冲击功比 20 °C 横向、纵向冲击功提高更明显些, -40 °C 横向冲击功从 87 J 提高到 136 J, -40 °C 纵向冲击功从 94 J 提高到 179 J; 而 20 °C 横向冲击功从 62 J 提高到 87 J, 20 °C 纵向冲击功从 70 J 提高到 102 J。所以 Ni 含量的提高, 对低温冲击韧性的作用更加明显。从图 4 中 -40 °C 冲击断口也可看出, 3 种成分的试验钢 -40 °C 冲击断口扩展形貌为主要为韧窝状塑性断裂, 从图 4 中进一步看出, 图 4(a) 0.20% Ni 含量的断口韧窝大、浅, 且大韧窝之间夹杂着解理小刻面, 断口形貌为韧窝 + 解理断裂; 图 4(b) 0.80% Ni 断口韧窝尺寸大小不等, 大韧窝是由韧窝经塑性变形后扩展、聚集长大而成, 断口形貌为韧窝 + 准解理断裂; 图 4(c) 1.20% Ni 断口韧窝多且小而深, 断口形貌为韧窝断裂, 冲击断口形貌的变化规律说明随着 Ni 含量的提高, 冲击断口韧窝越来越多, 图 4(c)

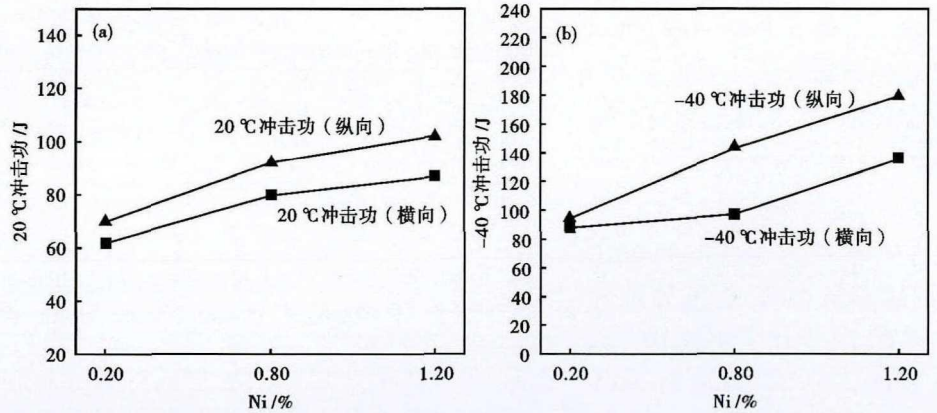


图 3 Ni 含量对高铁车轴钢 20 °C (a) 和 -40 °C (b) 冲击功的影响  
Fig. 3 Effect of Ni content on impact energy of high-speed railway axles steel at 20 °C (a) and -40 °C (b)

1. 20% Ni 含量材料在 -40 °C 呈现出完全塑性断裂的断口形貌。

### 3.3 3 种国产化高铁车轴钢组织

通过利用光学显微镜(OM)放大 100 倍对热处理后的 3 种试验钢进行晶粒度评级, 见表 4, 0.20% Ni 材料晶粒度为 7~6 级, 0.80% Ni 和 1.20% Ni 材料晶粒度为 8~7 级。放大 500 倍对 3 种试验钢的组织进行观察发现, 见图 5, 3 种成分的高铁车轴钢调质热处理后组织均为贝氏体 + 回火马氏体组织, 并且随着 Ni 含量的升高, 贝氏体比例增多, 回火马氏体减少, 对应的组织见(图 5)。

### 3.4 3 种国产化高铁车轴钢低温脆性转变性能

表 4 0.20% Ni, 0.80% Ni 和 1.20% Ni 高铁车轴钢晶粒度及组织

Table 4 Grain rating and structure of 0.20% Ni, 0.80% Ni and 1.20% Ni high-speed railway axles steel

试验钢	晶粒度/级	组织	热处理工艺
0.20% Ni	7~6	贝氏体 + 回火马氏体	900 °C 正火 + 880 °C
0.80% Ni	8~7	贝氏体 + 回火马氏体	淬火 + 650 °C 回火、淬
1.20% Ni	8~7	贝氏体 + 回火马氏体	火介质为水

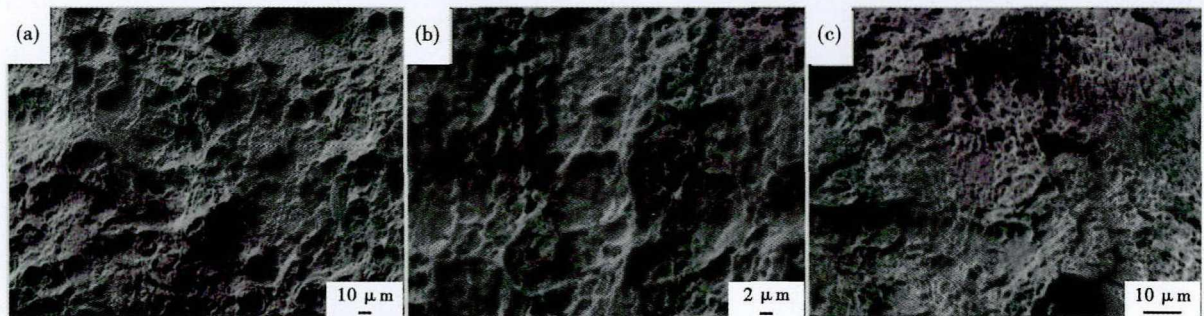


图 4 (a) 0.20% Ni; (b) 0.80% Ni 和 (c) 1.20% Ni 高铁车轴钢冲击性能 -40 °C 断口形貌

Fig. 4 Fracture morphology of (a) 0.20% Ni; (b) 0.80% Ni and (c) 1.20% Ni high-speed railway axles steel of impact energy at -40 °C

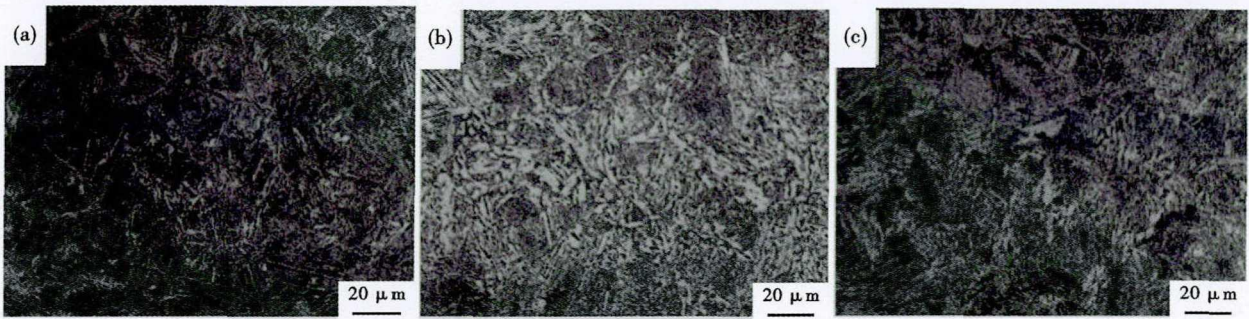


图 5 (a)0.20% Ni, (b)0.80% Ni 和 (c)1.20% Ni 高铁车轴钢组织形貌

Fig. 5 Structure morphology of (a) 0.20% Ni, (b) 0.80% Ni and (c) 1.20% Ni high-speed railway axles steel

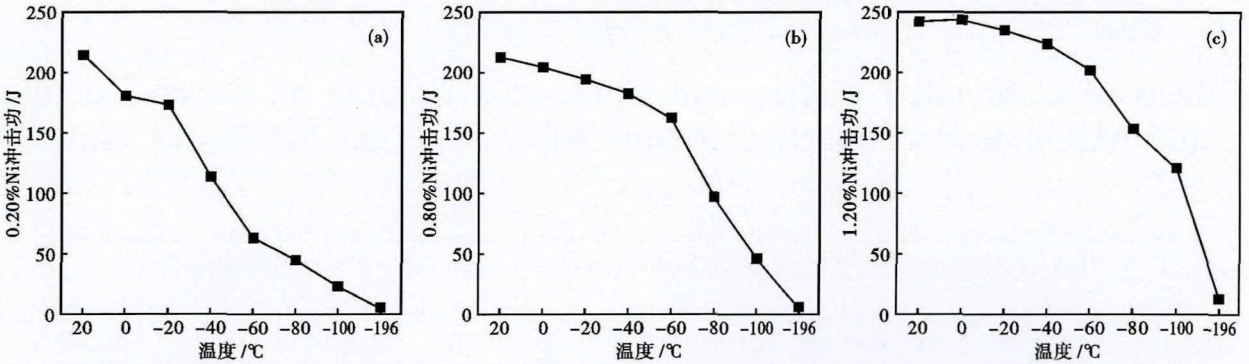


图 6 (a)0.20% Ni, (b)0.80% Ni 和 (c)1.20% Ni 高铁车轴钢的冲击功-温度曲线

Fig. 6 Impact energy-temperature curve of (a) 0.20% Ni, (b) 0.80% Ni and (c) 1.20% Ni high-speed railway axles steel

材料脆性转变温度是材料韧脆转变倾向的重要性能指标,脆性转变温度的高低决定了材料在低温条件下韧性的好坏,从而直接影响材料的温度使用范围。本实验通过采用系列冲击的方法测得 3 种高铁车轴钢 -196 ~ 20 ℃ 温度间的系列冲击功,绘制出如图 6 的冲击功-温度曲线,同时结合断口形貌观察,确定了 3 种试验钢的脆性转变温度,0.20% Ni 试验钢的脆性转变温度为 -30 ℃ 左右,0.80% Ni 试验钢的脆性转变温度为 -60 ℃ 左右,1.20% Ni 试验钢的脆性转变温度为 -100 ℃ 左右。

#### 4 结论

(1) 3 种国产化高铁车轴钢经过相同热处理,随着 Ni 含量的提高,抗拉强度与屈服强度逐渐提高,抗拉强度由 710 MPa 提高到 759 MPa,屈服 535 MPa 提高到 608 MPa,延伸率提高不明显,呈上升的趋势。

(2) 3 种国产化高铁车轴钢经过相同热处理,随着 Ni 含量的提高,20 ℃ 与 -40 ℃ 横向、纵向冲击韧性逐渐提高,当 Ni 含量从 0.80% 提高到 1.20% 后,-40 ℃ 冲击韧性比 20 ℃ 横向、纵向冲击韧性提高更明显些。

(3) 3 种成分的高铁车轴钢调质热处理后组织

均为贝氏体 + 回火马氏体组织,并且随着 Ni 含量的升高,贝氏体比例增多,回火马氏体减少,晶粒也更加细小。

(4) 3 种高铁车轴钢的脆性转变温度,随着 Ni 含量的升高,脆性转变温度越来越低,韧脆转变温度由 -30 ℃ 降低到 -100 ℃。

国家重点研发计划资助项目(2017YFB0304603)“高寒地区用高韧性耐疲劳高速车轴钢关键制造与应用技术”

#### 参考文献

[1] 顾家琳,刘淑华,周惠华,等. 25CrMo 钢高速车轴坯的试制[J]. 中国铁道科学,2014, 35(6): 99-104.  
 [2] 吴毅,赵雷. 中国标准动车组车轴研制与应用[J]. 铁道车辆,2017, 55(12): 26-30.  
 [3] 宋维锡.《金属学》[M]. 北京:冶金工业出版社,1980:370.  
 [4] 中国铁路总公司. 动车组车轴企业标准:Q/CR639-2018[S]. 北京:中国铁道出版社,2018:3-5.  
 [5] 王之香,王玉玲,邬中华. 淬回火参数 250 mm × 250 mm EA4T 高速动车轴用钢组织和性能的影响[J]. 特殊钢,2015,36(3):67-68.

王之香(1975-),女,硕士(2011年北京科技大学),正高级工程师,2000年鞍山科技大学(本科)毕业,车轴和齿轮钢开发。E-mail:Wangzx@tisco.com.cn

收稿日期:2020-08-31