

时速 350 km 中国标准动车组车轴用钢 DZ2 的生产工艺实践

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 时速 350 km 中国标准动车组车轴用钢 DZ2(/% :0.24~0.32C,0.20~0.40Si,0.60~0.90Mn,0.90~1.20Cr,0.50~1.50Ni,0.20~0.30Mo, ≤0.010P, ≤0.010S)250 mm×250mm 钢坯试制流程为 80 t EBT 电弧炉-LF-VD-浇铸 8.4 t 钢锭-轧制工艺。通过电弧炉热装 ≥80% 的预处理铁水,电弧炉控制终点 [P] ≤0.006% 和 [C] >0.10%,出钢留钢 10%,LF 高碱度渣 (CaO)/(SiO₂) =9~12 精炼,控制白渣时间 20 min 以上,VD 后喂 1.0 kg/t 的 Si-Ca 线,氩气保护浇铸等工艺措施,使生产的 DZ2 钢的洁净度为 [O] ≤10×10⁻⁶, [H] ≤1.0×10⁻⁶, P ≤0.008%, S ≤0.005%, A、B、C、D、Ds 类非金属夹杂物级别 ≤1.0, DZ2 车轴钢坯和车轴技术指标符合 TJ/CL520-2016《动车组用 DZ2 车轴暂行技术条件》的技术要求,钢坯及车轴已通过铁路总公司组织的上车评审,并完成 6×10⁵ km 的运用考核试验。

关键词 中国标准动车组 车轴用钢 DZ2 EBT 电弧炉-LF-VD 生产工艺实践

Practice of Production Technology for 350 km/h Chinese Standard EMU Axle Steel DZ2

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

Abstract The pilot production flow sheet of the 350 km/h Chinese Standard EMU DZ2 Axle Steel (/% :0.24~0.32C,0.20~0.40Si,0.60~0.90Mn,0.90~1.20Cr,0.50~1.50Ni,0.20~0.30Mo, ≤0.010P, ≤0.010S) 250 mm×250 mm is 80 t EBT EAF-LF-VD-8.4 t ingot casting-rolling mill practice. With the process measures including electric arc furnace hot charging >80% pre-treating hot metal, EBT electric arc furnace controlling end [P] ≤0.006% and [C] >0.10%, 10% heel liquid in tapping, refining of with LF high basicity slag (CaO)/(SiO₂) =9~12 and white slag hour with twenty minute upwards, after VD process feeding 1.0 kg/t Si-Ca wire and argon shielding ingot casting, the cleanliness of produced steel DZ2 is [O] ≤10×10⁻⁶, [H] ≤1.0×10⁻⁶, P ≤0.008%, S ≤0.005%, and inclusion rating of A, B, C, D and Ds series ≤1.0, the technical indexes of bloom and axle of steel DZ2 all meet TJ/CL520-2016《Tentative specifications of DZ2 EMU Axle》, bloom and axle is past the step-up judging of the railway head office organizational, and finished 6×10⁵ km handle examine test.

Material Index Chinese Standard EMU, DZ2 Axle Steel, EBT EAF-LF-VD, Practice of Production Technology

从 2012 年开始,开展了中国标准动车组时速 350 km 动车组国产化关键部件之一车轴的研制工作^[1]。开发出了具有完全自主知识产权的车轴材料,并命名车轴材质代号为 DZ2,2016 年形成了 TJ/CL520-2016《动车组用 DZ2 车轴暂行技术条件》,其技术要求要远远高于欧洲高速车轴用钢 EN 13261-2010《铁路应用轮对及转向架车轴产品要求》^[2]中 EA4T 的标准要求。

1 时速 350 km 中国标准动车组车轴用钢的主要技术要求

1.1 DZ2 钢的化学成分见表 1

1.2 钢中气体含量

[H] ≤1.5×10⁻⁶, 钢中 [O] ≤15×10⁻⁶。

1.3 钢中非金属夹杂物

钢坯中非金属夹杂合格级别应符合表 2 的规定。

1.4 力学性能

试样应经过“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 3。

1.5 晶粒度

晶粒度试样应取自拉伸试样未变形的大端按 GB/T6394-2002 要求对钢坯进行奥氏体晶粒度检验,晶粒级别 ≥6 级,且最高与最低级别差 ≤3 级。

表 1 DZ2 钢的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of steel DZ2/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Al	Cu
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

表 2 DZ2 钢坯非金属夹杂物的要求/级

Table 2 Requirement on nonmetallic inclusion in billet of steel DZ2/rating

A 系 (硫化物类)		B 系 (氧化物类)		C 系 (硅酸盐类)		D 系 (球状氧化物类)		B+C+D		Ds 类 单颗粒氧化物类
粗	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗	细	
≤1.5	≤1.5	≤1.0	≤1.5	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤1.5	≤2.0	≤3.0	≤1.5

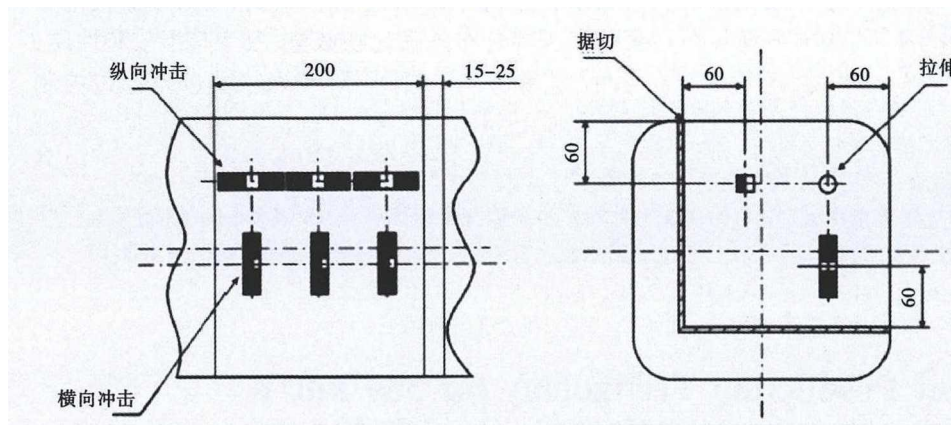


图 1 取样位置示意图

Fig. 1 Schematics of sampling location

表 3 DZ2 钢力学性能要求

Table 3 Requirement on mechanical property of steel DZ2

R_m / MPa	R_{el} / MPa	A/ %	20 °C K_{I2} /J		-40 °C K_{I2} /J	
			纵向	横向	纵向	横向
680 ~ 850	≥ 450	≥ 18	≥50	≥30	≥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。

2 工艺流程及工艺重点

2.1 工艺流程

DZ2 车轴坯生产工艺流程为:80 t EBT 电弧炉冶炼→LF 精炼→VD 真空脱气处理→模铸 8.4 t 钢锭→初轧机轧制成 250 mm × 250 mm 方钢→退火→精整、检验、交货。

2.2 工艺重点

2.2.1 电弧炉冶炼

铁水和废钢相比,有害元素少,所以冶炼标准动车组 DZ2 车轴钢时采用铁水比例 ≥ 80% 冶炼工艺,可实现钢中有害元素 Pb、As、Sb、Sn 和 Sb 的含量 ≤ 0.01%,另外由于铁水碳含量高,在冶炼中通过碳氧反应脱除,熔池活跃沸腾,在冶炼过程中脱 C、脱 P、去气,可以进一步净化钢质,钢水纯净度高。电弧炉出钢控制 P ≤ 0.006%,终点 [C] ≥ 0.10%,温度 1 640 ~ 1 680 °C,电弧炉出钢时要求留渣、留钢(留钢约装炉量 10%)。

电弧炉出钢随钢流加合金,进行初步合金化。

2.2.2 LF 精炼

将装有钢水的钢包移到精炼工位,加电石造还原渣,在该工序中在线加 Al 丸,采用 CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO 渣系,控制熔渣碱度(R)为 9.0 ~ 12.0 (R 为 CaO/SiO₂);根据化学元素进 LF 第 1 个试样分析结果加入相应铁合金或金属来微调各元素成分,在白渣下保持不少于 20 min,使钢水中各元素成分达到以下范围且温度为 1 650 ~ 1 680 °C 时,将钢水移出该钢包炉精炼工序,化学成分范围(/%)为:0.25 ~ 0.30C, 0.75 ~ 0.85Mn, 0.25 ~ 0.35Si, 0.95 ~ 1.15Cr, 1.00 ~ 1.50Ni, 0.20 ~ 0.30Mo, 0.02 ~ 0.06V, ≤

0.008P, ≤ 0.005S。

2.2.3 VD 真空脱气

将钢包移到 VD 真空脱气处理工位,底吹氩气,抽真空,进行真空脱气处理,钢包在高真空度(钢包内的压强 ≤ 67 Pa)下保持 ≥ 20 min,抽真空结束,开启空气破空阀,停吹氩气,并喂入每吨钢水 3.0 kg 的 Si-Ca 线,然后开启底吹氩气,时间 ≥ 10 min,控制吹氩强度,保持钢水不裸露,液面上下波动,出工位温度 1 560 ~ 1 570 °C。

2.2.4 浇注

将装有钢水的钢包移到铸台,钢锭模内吊挂保护渣,浇注过程采用氩气保护进行浇铸;浇铸锭型为 8.4 t 大钢锭,锭身浇注速度为 7 ~ 9 kg/s;帽口的浇注速度 1.5 ~ 3.0 kg/s。并进行 2 次减流操作,帽口铸至 2/3 时加入发热剂后,钢锭红送轧制工序^[3]。

2.2.5 轧制

采用均热炉加热钢锭到 (1 270 ± 10) °C,保温 2 ~ 4 h,总加热时间 7 ~ 9 h,然后轧制成 250 mm × 250 mm 方坯,之后 690 °C 保温 10 h 进行红退火。

3 钢坯检验结果及讨论分析

3.1 化学成分及气体含量

一般情况下,强度和塑性成反比,而高速车轴为了保证车轴有高的抗疲劳性能,要求屈服强度、延伸

率、断面收缩率及冲击韧性均很高,综合考虑 C、Mn、Cr、Ni、Si、Al、V、P、S 等元素对钢的组织 and 性能的影响^[3],特别是 Ni 元素的作用,Ni 在提高钢强度的同时,对钢的韧性、塑性以及其它工艺性能的损害较其它合金元素为小,甚至能改善钢的韧性。钢中 Ni 与 Fe 以不同形式存在于铁素体和奥氏体中,使之强化,并通过细化 α 相的晶粒,改善钢的低温性能,特别是冲击韧性^[4],实验室摸索了 Ni 的最佳控制范围,结合其实验结果,时速 350 km 中国标准动车组车轴用钢的内控成分控制目标为表 4,随机统计 5 炉钢,DZ2 钢的化学成分和气体含量检测结果见表 4。

3.2 非金属夹杂物

非金属夹杂物的产生可分为脱氧产物、钢水的

二次氧化产物及外来夹杂物,由于该钢冶炼采用铝脱氧工艺,铝脱氧钢易产生 B 类夹杂,解决铝脱氧钢 B 类夹杂对钢质的危害,可通过复合脱氧、精炼控制夹杂物、夹杂变性处理等脱氧精炼方法。去除方法:(1)VD 炉出钢前喂 CaSi 线复合脱氧,向钢中加入 Ca,可使串簇状 Al_2O_3 变为球状的 CaO- Al_2O_3 系夹杂物,后者易从钢中分离出去,同时减少钢中有害的沿晶界分布的硫化物数量,改变其组成和性质,从而洁净钢水;(2)钢水进行吹氩处理时,通过控制时间软吹时间不得低于 10 min、压力及流量参数控制以观察液面蠕动为准;(3)浇铸采用吹 Ar 气保护浇注,注前流钢 0.5 t,注后留钢 1 t。通过以上措施的综合作用,保证钢液的纯净度,效果见表 5。

3.3 力学性能

表 4 试验 DZ2 钢化学成分/%
Table 4 Chemical composition of test steel DZ2/%

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	V	Mo	Al	[H]	[O]
内控要求	0.25 ~ 0.30	0.25 ~ 0.35	0.75 ~ 0.85	≤ 0.010	≤ 0.005	0.95 ~ 1.15	1.00 ~ 1.50	≤ 0.20	0.02 ~ 0.06	0.20 ~ 0.30	0.010 ~ 0.040	≤ 0.000 2	≤ 0.001 5
1#	0.25	0.28	0.78	0.004	0.001	1.08	1.10	0.01	0.04	0.26	0.024	0.000 08	0.000 9
2#	0.26	0.32	0.79	0.004	0.001	1.10	1.15	0.01	0.04	0.26	0.029	0.000 08	0.000 9
3#	0.27	0.31	0.83	0.005	0.001	1.13	1.18	0.01	0.04	0.26	0.028	0.000 07	0.000 8
4#	0.26	0.29	0.81	0.002	0.001	1.00	1.13	0.01	0.04	0.27	0.024	0.000 09	0.000 9
5#	0.27	0.27	0.81	0.004	0.001	1.05	1.10	0.01	0.04	0.26	0.023	0.000 06	0.000 8

表 5 试验 DZ2 钢非金属夹杂物检验结果/级
Table 5 Examination results of nonmetallic inclusion in test steel DZ2/rating

炉号	非金属夹杂物								Ds
	A		B		C		D		
	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗	
1#	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0
2#	0	0	0	0	0.5	0	0.5	0	0
3#	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0
4#	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0.5
5#	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0
标准	≤1.5	≤1.5	≤1.0	≤1.5	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤1.5	≤1.5

时速 350 km 中国标准动车组车轴用 DZ2 钢在塑性指标保持在同类车轴水平的基础上,将屈服强度和抗拉强度要求分别提高至 ≥450 MPa 和 680 ~ 850 MPa,较 EN 13261-2010 中 EA4T 车轴的静强度指标明显提升;考虑到我国幅员辽阔,动车组运行区间温度相差较大,在 20 °C 时,缺口为 5 mm 深的试样冲击功要求基础上增加了 -40 °C,缺口为 2 mm 深的试样冲击功标准要求: -40 °C 纵向冲击功 ≥25 J, -40 °C 纵向冲击功 ≥30 J,使车轴性能具有更好的低温适应性^[4]。材料的优良性能最终需通过合理的热处理工艺来实现,为获得材料良好塑韧性和

抗疲劳性能,车轴材料要求调质工艺处理,采用 GLEEBLE-3800 型热力学模拟试验机测定热膨胀曲线,测得 DZ2 钢临界点 Ac_3 温度为 822 °C、 Ac_1 为 736 °C,根据热处理工艺原理,实验获得了“900 °C 保温 1 h 正火 + 880 °C 保温 1 h 淬火 + 600 °C 保温 1 h”回火的合理的调质热处理工艺后,把调质热处理后的试样按照图 1 所示位置进行取样,制取典型的拉伸、冲击试样。从表 6 可以看出,各项性能满足标准要求,尤其是冲击功,远远高于标准要求,另外由于冲击缺口深度的不同, -40 °C 冲击功 U2(2 mm 缺口)比 20 °C 冲击功 U5(5 mm 缺口)高约 2 倍。

表 6 试验 DZ2 钢的力学性能
Table 6 Mechanical properties of test steel DZ2

炉号	$R_{el}/$ MPa	$R_m/$ MPa	A/ %	20 °C 冲击 U5/J		-40 °C 冲击 U2/J	
				纵向	横向	纵向	横向
1#	605	749	22.5	93	80	199	166
2#	630	766	20	89	78	173	164
3#	616	750	24	98	85	215	174
4#	712	822	22	96	92	210	189
5#	708	823	23	96	87	213	169
标准	≥450	680 ~ 850	≥18	≥50	≥30	≥30	≥25

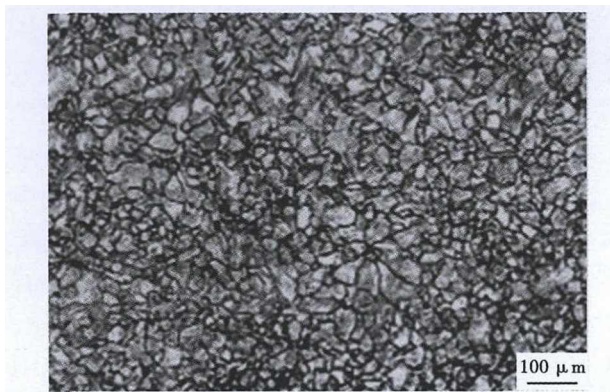


图 2 DZ2 钢 880 °C 1 h 淬火 + 600 °C 1 h 回火的晶粒度
Fig. 2 Grain size of steel DZ2 quenching at 880 °C for 1 h + tempering at 600 °C for 1 h

3.4 晶粒度

均匀、细小的晶粒度可保证车轴强韧性良好，同时也保证车轴钢探伤质量。通过控制钢中 Al、V 含量，保证了钢的晶粒细小，均匀，DZ2 钢通过 880 °C 保温 1 h 淬火 + 600 °C 保温 1 h 回火调质后的晶粒度为 8 级，见图 2。

3.5 车轴上车运行考核

太钢公司生产的 DZ2 钢的各项技术指标均符合《动车组用 DZ2 车轴暂行技术条件》，制成的钢坯及车轴已通过铁路总公司组织的上车评审，并且由 DZ2 材料制成的车轴装用在中车长春轨道客车股份有限公司生产的中国标准动车组上，通过大西客专（大同至西安高速铁路）、郑徐客专（郑州至徐州高速铁路）、哈大客专（哈尔滨至大连高速铁路）3 条不同线路累计不少于 6×10^5 km 的运用考核试验，自主化车轴外观状态良好，自主化车轴 6×10^5 km 时的探伤检查结果未见异常，目前运行状态良好^[5]。

4 结论

(1) 通过制定内控化学成分、电弧炉冶炼，LF 精

炼，VD 真空脱气技术和模铸工艺控制技术，太钢公司生产的时速 350 km 中国标准动车组车轴钢坯材质纯净、拉伸性能和冲击性能良好，各项技术指标均符合 TJ/CL520-2016《动车组用 DZ2 车轴暂行技术条件》技术要求。

(2) 通过 LF 精炼过程渣系控制、VD 真空处理夹杂物变性处理，钢包软搅拌以及浇铸过程控温控速、保护浇铸等技术，可保证钢中 $[O] \leq 10 \times 10^{-6}$ ， $[H] \leq 1.0 \times 10^{-6}$ ， $P \leq 0.008\%$ ， $S \leq 0.005\%$ ，A、B、C、D、Ds 类夹杂物均 ≤ 1 级。

(3) 太钢公司生产的 DZ2 材料制成车轴经过不少于 6×10^5 km 的运行考核试验，自主化车轴外观状态良好，自主化车轴 6×10^5 km 时的探伤检查结果未见异常。

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] 吴丞建. 合金钢[M]. 北京:冶金工业出版社,1980:43.
 [2] European Committee for Standardization EN 13261-2009 Railway Applications-Wheelsets and Bogies-Axles-Product Requirements[S]. Brussels:European Committee for Standardization,2010.
 [3] 王玉玲,王之香,郭中华. 大功率电力机车车轴用 EAIN 钢的生产工艺实践[J]. 特殊钢,2014,35(1):26-28.
 [4] 安运铮. 热处理工艺学[M]. 北京:机械工业出版社,1982:62.
 [5] 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):26-29.

王之香(1975-),女,硕士(2011年北京科技大学),高级工程师,2000年鞍山科技大学(本科)毕业,车轴、齿轮材料研究。E-mail:wangzx@tisco.com.cn

收稿日期:2018-11-01

欢迎订阅《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183 定价:16.00 元/期 96.00 元/年 邮编:435001

地址:湖北省黄石大道316号新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社