

面向汽车轻量化需求的 600 MPa 级冷冲压汽车 桥壳钢生产实践

Production Practice of 600 MPa Cold Stamping Automotive Axle Housing Steel for Lightweighting Applications

供稿|邢天庆, 李超, 耿云飞, 郭隆, 薛强, 张娜 / XING Tianqing, LI Chao, GENG Yunfei, GUO Long, XUE Qiang, ZHANG Na

内 容 导 读

随着国家对节能减排要求的不断提高,汽车轻量化已成为重要发展方向。汽车驱动桥壳,作为承载车身重量和传递动力的关键“骨骼”,其材料在保证足够强度的同时,更需要具备良好的可加工性和韧性。本文聚焦于一种新型高强度桥壳钢——Q500QK的研发与生产。通过调整钢的成分(如采用低碳并添加微量铌、钛等元素),并精确控制加热、轧制和冷却的温度,成功生产出厚度为12 mm、适用于冷冲压工艺的Q500QK钢板。实践证明,该钢板强度均匀稳定,内部晶粒细小,低温下依然保持优异的抗冲击韧性。用其制造的桥壳零件,在保证承载能力和疲劳寿命的同时,实现了显著的减重效果。这为商用车在满足严苛排放标准的前提下,实现“强健”与“轻盈”的统一,提供了一种可靠的材料解决方案。

商用中、重型卡车驱动桥是仅次于发动机和控制室的核心部件^[1],是汽车行驶系统的重要构件。驱动桥壳是驱动桥系统的主体,关系到整车的承载能力、使用寿命和安全性能等,所以对其机械强度、刚度和疲劳强度的要求均较高^[2]。汽车桥壳作为汽车重要构件,其质量减轻对于汽车轻量化具有重要意义。随着国家出台更加严格的排放标准,汽车轻量化发展进一步加深,商用车桥壳质量上存在一定

的减质量空间。研究表明^[3-4],当钢板厚度分别减少0.05、0.10以及0.15 mm时,车身减重质量幅度依次达到6%、12%和18%;并且车辆总质量每降低10%,燃油消耗量便能降低6%~8%。国内外汽车行业目前广泛使用热轧桥壳钢来制作桥壳,取代笨重且成本高的铸造桥壳。钢板冲焊式商用车桥壳最初采用20 mm厚度的Q355B材质热冲压加工,后逐步采用16 mm厚度的Q460QK材质热冲压加工。随着

作者单位:河钢集团唐山钢铁集团有限责任公司,河北 唐山 063000

车企竞争力的增加以及轻量化发展,降本增效成为车企的共性目标。目前,部分商用车配套厂大多采用 12~14 mm 厚度的 Q500QK 材质冷冲压加工替代热冲压加工。与热冲压加工方式相比,冷冲压加工可减少加热过程中的能源消耗和钢板烧损,以及减少在热冲压后冷却的能源消耗,降低生产成本。但冷冲压加工的变形抗力较大,钢板材料变形过程中易发生各部位不均匀变形的情况,从而易导致成品桥壳部分位置尺寸超标或开裂。因此,冷冲压加工桥壳对材料的成形性能要求较高。本文设计一种低碳铌钛微合金成分体系的冷冲压用 Q500QK,并对其进行生产及综合性能评价。

生产工艺控制

生产流程及化学成分

2050 热轧产线的工艺流程为:铁水预处理→转炉冶炼→钢包(LF)精炼→真空循环脱气(RH)精炼→连铸→步进式加热炉→粗轧→精轧→层冷→卷取。

碳(C)元素的添加能以较低成本大幅增强钢板强度,但它会对钢板的塑性、韧性以及焊接性能产生负面影响,还会导致韧脆转变温度升高。Q500QK 使用冷冲压加工,需要用较低的碳含量控制,但碳质量分数为 0.08%~0.16% 易发生包晶反应,影响铸坯质量,综合考虑碳质量分数应控制在 0.06% 左右。

锰(Mn)元素的添加能够起到固溶强化的作用,提升钢板的强度,并有一定的晶粒细化作用^[5],但过高的锰含量易造成铸坯中心偏析,影响铸坯及钢板质量、焊接质量,故锰质量分数控制范围为 1.40%~1.80%。

铌(Nb)元素是常用的微合金元素,有明显细

化晶粒的作用,这是因为铌的碳氮化物弥散的颗粒能对奥氏体晶界起固定作用,阻碍奥氏体晶界的迁移,即阻止了奥氏体晶粒长大,铌元素既能提升钢板强度也能提升钢板韧性^[6-7]。

钛(Ti)元素以固溶态存在,可强化铁素体,微量的钛能够起到一定的细化晶粒作用,同时改善焊接热影响区的冲击性能^[8]。另外钛元素可强固氮元素,钛元素的添加能够提高铌元素的利用率,但过高的钛含量会影响焊接质量。

铝(Al)元素是钢中常见的脱氧剂,钢中加入少量的铝可细化晶粒,抑制低碳钢的时效,改善钢在低温时的韧性,特别是降低钢的韧脆转变温度。

铬(Cr)元素的添加可使钢板在高温氧化过程中,与氧(O)元素的结合能力显著高于 Fe 与 O 的结合能力,因此 Cr 会优先在钢板表面发生氧化,形成致密的 Fe-Cr 尖晶石相^[9-10]。致密的 Fe-Cr 尖晶石相可有效阻碍 Fe^{2+} 和 O^{2-} 的交互扩散,延迟它们之间物质的传输,使离子扩散所需的激活能增大,从而对基体表面起到保护作用,提高钢基体的抗氧化能力,降低氧化铁皮厚度。适当添加 Cr 元素,能够避免冷冲压过程中材料表面氧化铁皮发生大量剥落的情况,为材料后续的冷冲压提供了便利条件。

磷(P)元素会增加钢的冷脆性,降低桥壳钢的焊接性能;硫(S)元素会加剧钢的热脆问题,严重影响带钢的冲击韧性。因此,生产过程中应严格控制这两种元素的含量。硅(Si)是常用的脱氧剂,在钢中起到固溶强化作用,但过高的 Si 会显著降低塑性和韧性,故本设计以 0.12% 为下限以确保强化效果,并以 0.23% 为上限防止对塑性和焊接性产生不利影响。

综上所述,确定 Q500QK 的化学成分如表 1 所示。

表 1 Q500QK 的化学成分(质量分数)

项目	C	Mn	S	P	Si	Al	Nb、Ti、Cr
目标值	0.06	1.60	≤0.006	≤0.016	0.15	0.035	适量
控制范围	0.05~0.07	1.40~1.80	≤0.008	≤0.018	0.12~0.23	0.020~0.050	适量

热轧工艺

根据 Q500QK 目标成分,利用 JMatPro 软件计算过冷奥氏体连续冷却转变曲线,如图 1 所示。

通过软件计算可知,奥氏体-铁素体转变温度(A_{f3})为 834.7℃,铁素体-珠光体转变(A_{f1})温度为 690.5℃,为避免两相区轧制造成混晶,精轧出口

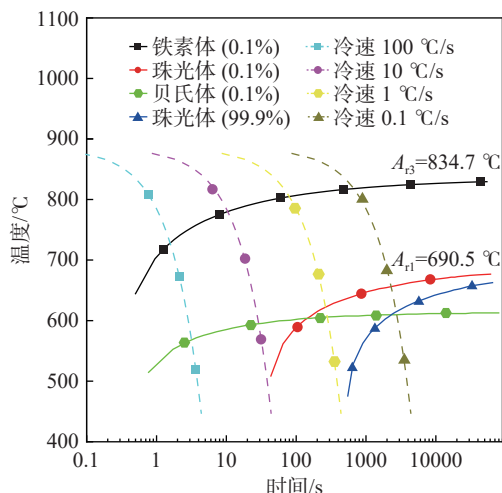


图1 过冷奥氏体连续冷却转变曲线

温度目标设定应高于 A_{r3} 温度。板形质量对冲压过程起着关键作用，而低温卷取易造成板形质量不良。

这是因为在铁素体相变过程中或结束后，(Ti, Nb)C 沉淀析出，产生强烈的沉淀强化效果，过低的卷取温度易使钢的内部产生较多的内应力，影响板形质量，进而影响加工成形质量。卷取温度过高易因冷速不足，导致硬化相不足而造成强度不足。因此，当采用卷取温度控制珠光体生成时，卷取温度应控制在 A_{r1} 以下。

综合考虑该钢的目标卷取温度设定为 600 °C。由于客户用途为冷冲压，若氧化铁皮厚度过大，冲压变形过程中氧化铁皮易大面积脱落在钢板与磨具间隙中，造成脱模困难或磨具、零件划伤，影响加工质量，故采用较低的精轧入口温度控制精轧区域氧化铁皮的产生。由于该钢中添加一定量的微合金，为保证加热过程中充分固溶，强化效果，需保持较高的加热温度。Q500QK 热轧工艺参数如表 2 所示。

表2 Q500QK 热轧工艺参数

公称厚度/mm	出炉温度/°C	精轧入口温度/°C	精轧出口温度/°C	卷取温度/°C
12	1180~1200	960~1000	860~900	580~620

试验材料及方法

试验采用成品厚度为 12.0 mm、长度为 1760 mm 的热轧钢样品，在板宽工作 (OS) 侧、工作 (OS) 侧 1/4、1/2、驱动 (DS) 侧 1/4、驱动 (DS) 侧位置分别取拉伸试样、弯曲试样、冲击试样，并依次命名为 OS、OS_{1/4}、C_{1/2}、DS_{1/4}、DS，采用德国 Zwick-Roell/Z100 万能材料拉伸试验机进行拉伸试验检测，拉伸试验过程中万能试验机夹头的移动速度设定为 2 mm/min；冲击试验分别在 20、0、-20、-40、-60 °C 下进行

检测。截取纵向 10 mm×10 mm 金相试样，用体积分数为 5% 的硝酸酒精溶液侵蚀约 8 s、无水乙醇冲洗后吹干，用德国蔡司光学显微镜查看组织，利用牛津仪器扫描电镜进行微观组织分析。

试验结果及分析

力学性能

Q500QK 钢出厂性能要求及实际值如表 3 所示。通过数值可以看出，板宽方向力学性能差波动在 20 MPa 以内，横向力学性能均匀性较好。

表3 Q500QK 力学性能检验结果

项目	厚度/mm	取样位置	抗拉强度/MPa	下屈服强度/MPa	断后延伸率/%
企业要求	8~18	—	600~750	≥500	≥18
实际	12	OS	621	535	23.0
		OS _{1/4}	625	525	22.5
		C _{1/2}	629	529	22.0
		DS _{1/4}	624	538	24.0
		DS	639	545	22.5

冲击韧性及冷弯性能

钢板冲焊式桥壳要求钢板原料具有较好的塑性

变形，而 Q500QK 应用于冷冲压加工的过程中存在较大的变形抗力及加工硬化，因此对 Q500QK 钢制

性提出了更高要求。本文中 Q500QK 试验钢在 $-60\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击温度下的冲击功均 $>260\text{ J}$ ，未出现明显韧脆转变温度，冲击功随冲压温度变化曲线如图 2 所示。 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击温度下冲击断口截面全部为韧性断裂，韧窝较深； $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击温度下冲击断口主要为韧性断裂，部分位置无明显韧窝，冲击断口形貌与冲击功相吻合，能够满足低温环境下使用； $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击温度下断口形貌如图 3 所示。对 Q500QK 进行折弯拍扁试验，未见裂纹，如图 4(a) 所示。黑色条带为钢板表面变形后分离的氧化铁皮，白色部分为氧化铁皮剥落后的钢基体。图 4(b) 为放大后显微形貌，图中未见明显裂纹，折弯试验效果评

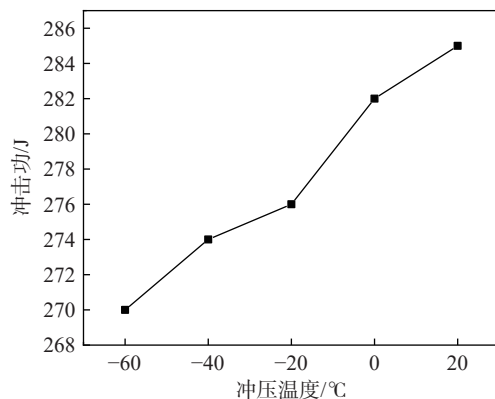


图 2 冲击功随冲压温度变化曲线

价良好。综上所述，Q500QK 冲击韧性及冷弯性能良好。

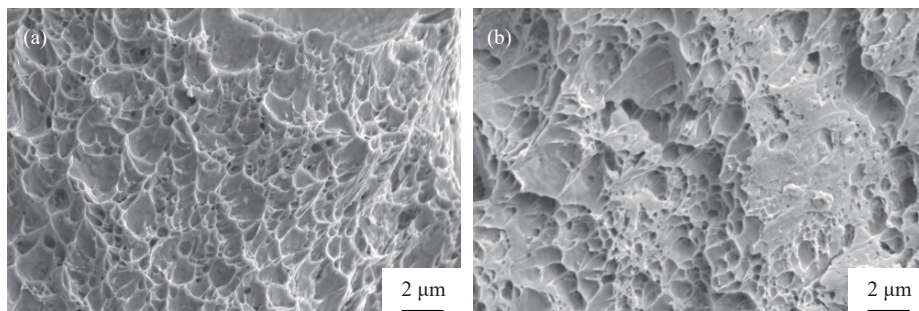
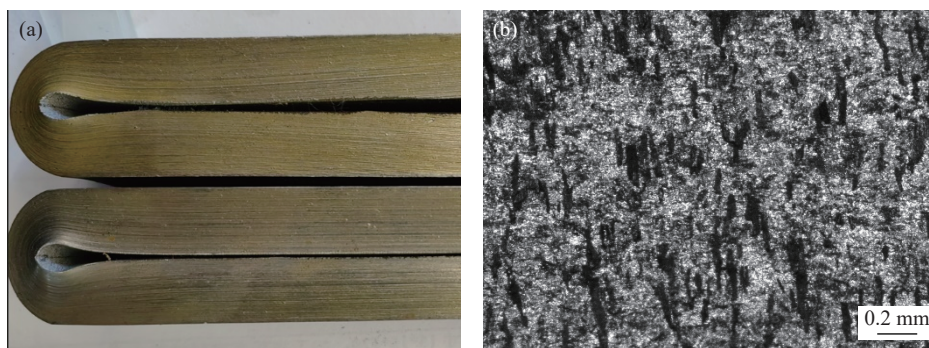
图 3 不同冲击温度下冲击断口形貌对比: (a) $20\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 

图 4 冷弯试样形貌: (a) 宏观形貌; (b) 放大后显微形貌

微观组织

采用光学显微镜及电子显微镜对试验钢进行组织分析，钢板组织为铁素体+贝氏体，结果如图 5 所示。按照 GB/T 6394—2017《金属平均晶粒度测定方法》评定其晶粒度为 12 级，晶粒较为细化，有助于提升带钢的综合性能，如图 5(a) 所示；按照 GB/T 13299—2022《钢的游离渗碳体、珠光体和魏氏体组

织的评定方法》评定其带状组织为 1 级。带状组织主要是由连铸坯在凝固过程中枝晶组织带来的锰元素偏析造成的，因凝固过程中枝间锰含量高于枝干处，加热和轧制过程中锰偏析没有完全消除，轧后钢板会在冷却相变前的奥氏体中形成贫锰带和富锰带^[11]。氧化铁皮厚度约 $6\sim 7\text{ }\mu\text{m}$ ，厚度适中，如图 5(b) 所示，氧化铁皮较连续，结合力较好，可见 Cr 成分能够有效提高氧化铁皮质量，可减少冲压过

程中氧化铁皮的剥落,从而有利于材料进行冷冲压。通过电子显微镜对微观析出物颗粒进行分

析,其主要为含 Nb、Ti 的析出物,如图 5(c) 和 5(d) 所示。

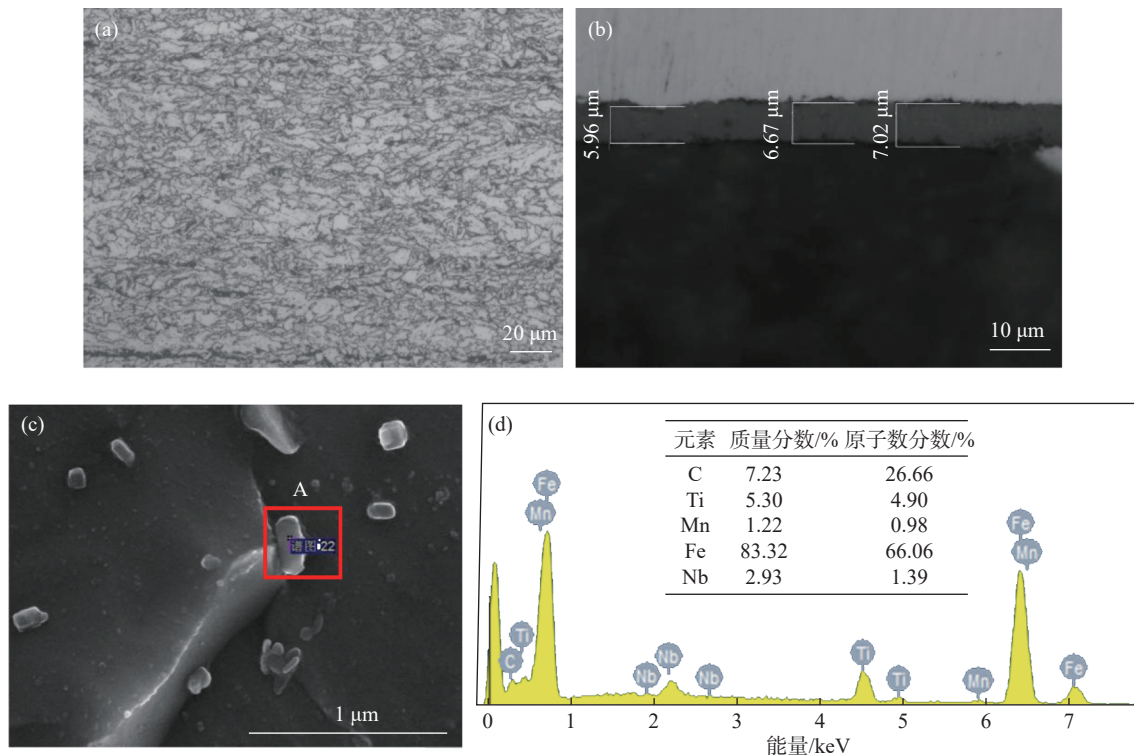


图 5 微观组织与能谱分析: (a) 金相组织; (b) 氧化铁皮厚度测定; (c) 析出物颗粒 (区域 A); (d) 析出物颗粒 (区域 A) 能谱分析

非金属夹杂物

利用光学显微镜对试验钢进行非金属夹杂物检测,可见长度为 67 μm、最大宽度为 24 μm 的非金属夹杂物,如图 6(a) 所示。利用电子显微镜对夹杂

物进行能谱分析,确认非金属夹杂物类型为 B 类氧化铝系非金属夹杂物,评级为细系 1 级,如图 6(b) 所示;能谱中存在 Ca 元素,可能是精炼工序中钙处理或石灰脱硫造成的钙残留,如图 6(c) 所示。该检测未发现其他类型的非金属夹杂物。

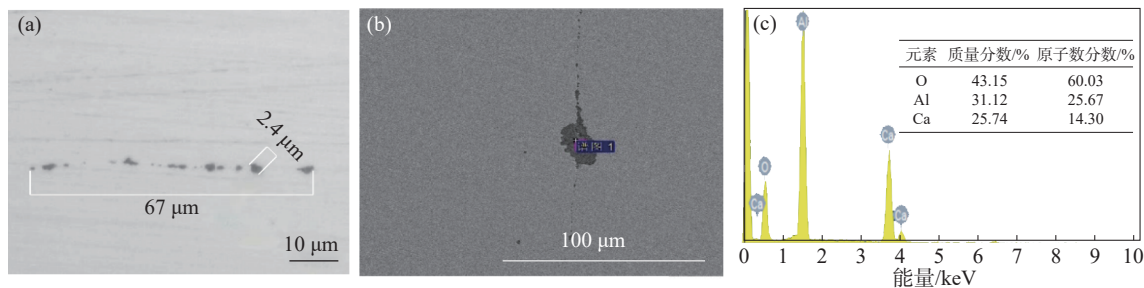


图 6 非金属夹杂物分析: 夹杂物形貌 (a) 和局部放大图 (b); (c) 能谱分析

零部件应用

经客户冷冲压试用后的试验钢零件实物照片如

图 7 所示。经评价,试验钢冲压过程中脱模质量良好,表面质量符合要求,钢板实际厚度 12 mm,零件最大减薄位置厚度为 10.26 mm,总减薄量 < 3 mm,

零件尺寸符合公差要求；通过台架试验对其进行疲劳测试，2.5 倍载荷下 80 万次未发生断裂，能够满足客户使用要求。



图 7 试验钢零件实物图

结束语

(1) Q500QK 试验钢采用低碳铌钛微合金复合成分体系，通过 Nb、Ti 等微合金的细晶强化及析出强化方式，以及较高的精轧出口温度及卷取温度，得到较为细化的铁素体+贝氏体组织，性能均匀性及低温冲击韧性均较好，该材料具备极寒环境下的服役条件。

(2) 通过添加 Cr 元素，试验钢表面氧化铁皮的厚度适中，氧化铁皮的结构致密性良好，可减少冲压过程中氧化铁皮的剥落，从而有利于材料进行冷冲压。

(3) 试验钢采用 LF+RH 双联冶炼工艺，钢水纯净度较好；试验钢仅存在较轻的 B 类非金属夹杂物，评级为 1 级，呈带状组织，对产品的综合性能影响较低，为桥壳钢冷冲压成形及服役耐疲劳使用奠定了良好的基础。

(4) 试验钢冷冲压成形性能良好，疲劳性能符合使用需求，其生产较为成功。

参考文献

- [1] 胡庆辉. 重载驱动桥系统刚度特性分析与动态优化 [学位论文]. 北京: 北京信息科技大学, 2013
- [2] 李攀. 商用车整体驱动桥壳成形工艺及关键技术研究 [学位论文]. 北京: 机械科学研究总院, 2017
- [3] 李春诚, 刘宏亮, 杨波, 等. δ -TRIP 钢的研究进展——轻量化高强度新星: δ -TRIP 钢如何助力汽车节能减排?. 金属世界, 2025(4): 15
- [4] 张鹏程, 武宏宾, 唐荻, 等. Nb-V-Ti 和 V-Ti 微合金钢中碳氮化物的回溶行为. 金属学报, 2007(7): 753
- [5] 刘艳玲, 黄重, 万国喜. 600 MPa 轻量化汽车桥壳用中板的研制开发. 河南冶金, 2019, 27(4): 9
- [6] 赵迪, 程业, 李博, 等. 降低含铝钢表面横裂纹的工艺实践. 连铸, 2020, 45(2): 14
- [7] 郭早勤, 尹绍江, 王丽云, 等. 唐钢低合金高强度结构钢 Q460C 的开发. 河北冶金, 2010(6): 20
- [8] 雷志亮, 赵振伟, 高兴健. 厚度规格和热轧工艺对热轧 X70M 管线钢 DWTT 的影响. 河北冶金, 2024(8): 17
- [9] 程磊, 孙彬, 杜重洋. Fe-Cr 钢在空气中的氧化行为. 钢铁, 2020, 55(7): 120
- [10] 曹光明, 刘怡私, 高欣宇, 等. 700 MPa 级别热轧高强钢氧化铁皮结构转变规律. 工程科学学报, 2019, 41(12): 1591
- [11] 刘辉, 王阳, 孙庆, 等. 700 MPa 大梁钢拉伸断后分层现象的解析. 钢铁, 2017, 52(11): 52

作者简介: 邢天庆 (1991—), 男, 辽宁省朝阳人, 2014 年毕业于辽宁科技大学材料成形及控制工程专业。主要研究方向: 热轧产品品种钢研发。通信地址: 河北省唐山市路北区钢城春邑 26-3; E-mail: 834626399@qq.com。