

轮辋用热轧车轮钢 BG590CL 开裂与减薄原因分析

Cause Analysis on Cracking and Thinning of Hot Rolled Wheel Steel BG590CL Used for Wheel Rim

供稿|修立民, 海超, 吉丽丽 / XIU Limin, HAI Chao, JI Lili

内 容 导 读

为揭示 5.5 mm 厚轮辋用热轧车轮钢 BG590CL 在成型过程中出现开裂的原因, 本文采用光学显微镜、扫描电镜等设备, 对轮辋焊接接头开裂部位及其母材的组织及夹杂物含量进行了分析。结果表明, 焊接接头开裂部位组织以魏氏体、贝氏体和珠光体为主, 母材存在 B 类与 D 类夹杂物, 其中粗大的魏氏组织及 1.0 级粗系 B 类夹杂物显著降低了焊接接头的韧性与塑性, 成为轮辋成型过程中焊接接头失效的主要因素。同时, 针对 5.0 mm 厚 BG590CL 闪光对焊接头及母材的硬度测试显示, 热影响区硬度最低, 焊缝、熔合区次之, 母材最高, 热影响区的软化现象是导致焊接接头局部减薄的主要原因。研究建议, 通过优化焊接热输入、控制卷取温度、提高冶炼纯净度及改善焊前装配精度等措施, 可有效提升焊接接头的成型性能, 降低开裂与减薄风险。

汽车轻量化是汽车行业的发展趋势, 钢制轮辋也通过不断提高材料强度达到减重的目的, 本钢汽车轮辋钢牌号由 BG380CL 逐渐升级为 BG420CL、BG490CL、BG590CL、BG650CL。但随着材料强度的提高, 轮辋在加工制造过程中面临着开裂、减薄问题的困扰。杨维宇等^[1]对高强韧性 490CL 轮辋用钢的焊接开裂原因进行分析, 结果表明焊缝处存在一定面积的以氧化锰为主的“灰斑”为焊缝开裂的主要原因; 张智刚等^[2]对 420 MPa 级轮辋用钢的焊接变形失效原因进行分析, 认为焊接热影响区与未受焊接热影响的材料硬度相差过大, 破坏了轮辋边缘

的变形协调能力, 进而在结合处产生应力集中并引发开裂; 何晓波等^[3]对 650 MPa 级轻量化轮辋用钢的焊接性进行分析, 结果表明该强度等级的轮辋用钢焊接淬硬性小, 具有良好的焊接性能; 张明博等^[4]分析了 380CL 钢焊缝开裂原因; 苏晨等^[5]研究了焊接工艺参数对 RS590CL 钢焊接接头性能的影响; 韩宇等^[6]分析了 RS590 钢焊缝开裂原因。

本文调研跟踪了辽宁衡业型钢生产线滚型车间车轮轮辋的生产工艺流程, 生产材质为本钢提供的 5.0、5.5 mm 厚 BG590CL 车轮轮辋用钢, 其主要生产工艺流程如下: 开卷→平整→剪切→滚圆→闪光

对焊→刨渣→切焊缝边→扩喇叭口→三次滚型→校正→气密检验→打孔→与轮辐焊接→涂装。

部分 BG590CL 车轮轮辋钢原料在生产过程中产生废品，主要原因是焊接接头出现开裂及严重减薄，如图 1 所示。现场跟踪结果显示，开裂形式主要有焊接接头部分开裂和完全开裂 2 种。在生产过程中，焊接接头开裂与减薄基本发生在扩口、滚型和校正 3 个工序阶段。

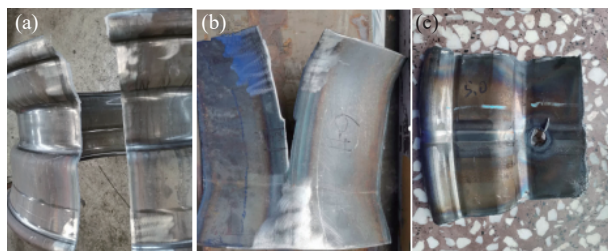


图 1 缺陷样品: (a) 完全开裂; (b) 部分开裂; (c) 减薄

试验材料与方法

试验材料为本钢生产的 5.5、5.0 mm 厚 BG590CL 钢，材料力学性能见表 1。

表 1 力学性能

下屈服强度, R_{eL} /MPa	抗拉强度, R_m /MPa	断后伸长率, A /%
≥480	≥590	≥20

在生产 5.0、5.5 mm 厚 BG590CL 轮辋时，辽宁衡业采用的焊接工艺参数如表 2 所示。试验中，选取 5.5 mm 厚 BG590CL 轮辋钢的完全开裂、部分开

表 2 闪光对焊参数

应用产品	烧化量/mm	带电顶锻时间/s	顶锻距离/mm
BG590CL	10	0.5	9

裂样品进行成分与组织检测，选取厚度 5.0 mm 的 BG590CL 轮辋钢减薄样品进行成分与硬度检测。

试验结果与分析

材料因素

材料成分

本钢供应的热轧态高强车轮钢 BG590CL，是低碳高锰并经过 Nb、Ti 微合金化的钢，通过低碳设计降低钢材的碳当量，从而提高焊接性能；同时，通过 Mn 的固溶强化作用，以及 Nb、Ti 的细晶强化与沉淀强化提高钢材的强度。该高强车轮钢适用于美国焊接协会（AWS）推荐的碳当量计算方式，经计算得出其碳当量为 0.35713。以板材焊接性为评定指标，结合成分体系与板材厚度判断，本钢产高强车轮钢 BG590CL 焊接性能优良，成分设计合理。从辽宁衡业废料区选取减薄样品（1[#]）、完全开裂样品（2[#]）、部分开裂样品（3[#]）进行检验，其成分检验结果如表 3 所示。与本钢生产的 BG590CL 产品的成分均值相比，减薄样品中强化元素 C、Mn、Nb+Ti 的含量基本相同，有害残余元素 P、S 的含量不高，表明其成分设计合理；而完全开裂与部分开裂样品中强化元素 C、Mn 的含量偏高，导致材料碳当量提高，焊接性能降低，但其有害残余元素 P、S 的含量与产品均值基本相同。

表 3 样品成分分析（质量分数）

样品编号	C	Si	Mn	P	S	Als	Nb	Ti
1 [#]	0.0792	0.104	1.56	0.012	0.0016	0.027	0.0650	0.028
2 [#]	0.1040	0.108	1.65	0.013	0.0036	0.030	0.0055	0.034
3 [#]	0.1030	0.109	1.62	0.011	0.0036	0.028	0.0056	0.033
标准值*	≤0.1200	≤0.500	≤1.70	≤0.025	≤0.0150	≥0.015	≤0.0900	≤0.050
均值	0.08	0.11	1.53	0.012	0.004	0.029	0.060	0.027

注：*参考本钢企业标准QBB109—2020。

影响车轮钢焊接性能的重要因素是母材的内部纯净度，具体体现在夹杂物评级指标上。在炼钢过程中，钢水冶炼造渣环节会导致少量氧化物和硫化物颗粒残留在钢水中形成夹杂物，这些夹杂物在轮

辋成型过程中可能形成微小的裂纹源，导致焊接接头等薄弱区域开裂。

选取表 3 中 2[#]、3[#]样品的断口部位进行金相检测，根据《钢中非金属夹杂物含量的测定标准评

级图显微检验法》(GB/T 10561—2023)中的A法,结果显示(见表4),2个样品的夹杂物级别均为B类粗系(BH)1.0级、B类细系(BT)1.0级、D类细系(DT)1.0级。脆性的B类、D类

夹杂物,特别是1.0级粗系B类夹杂物的存在会降低焊接接头的韧性。因此,建议进一步提高冶炼水平,以减小钢中非金属夹杂物的尺寸并降低其数量。

表4 开裂样品检验结果

样品编号	组织		晶粒度/级	夹杂物/级
	母材	缺陷		
2 [#]	铁素体+珠光体	魏氏体+贝氏体+珠光体	13.5	BT1.0; BH1.0; DT1.0
3 [#]	铁素体+珠光体	魏氏体+贝氏体+珠光体	13.5	BT1.0; BH1.0; DT1.0

选取表3中2[#]样品的断口部位进行扫描电镜检测,结果显示其断口形貌为解理断口,如图2所示。能谱分析结果表明(如表5所示),断口处夹杂物成分主要为O、Al、S、Ca、Mn、Fe元素。

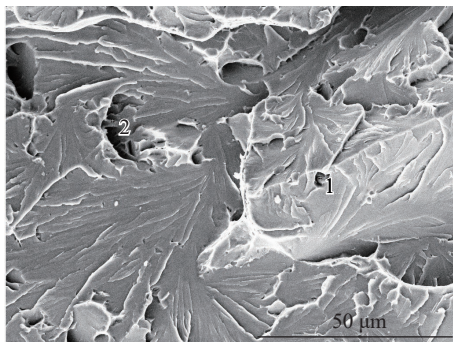
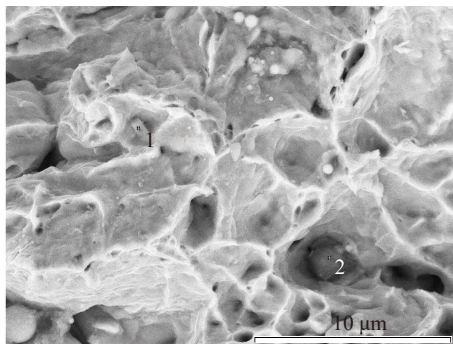
图2 2[#]样品断口形貌表5 2[#]样品断口表面能谱检验结果(质量分数) %

图2位置	O	Al	S	Ca	Mn	Fe
1	4.27	0.82	1.70	1.08	2.84	89.29
2	—	—	—	—	1.82	98.18

选取表3中3[#]样品的断口部位进行扫描电镜检测,结果显示其断口形貌为韧窝断口,如图3所示。

图3 3[#]样品断口形貌

示。能谱分析结果表明(如表6所示),断口处夹杂物成分主要为O、Ca、Ti、Mn、Fe元素。

表6 3[#]样品断口表面能谱检验结果(质量分数) %

图3位置	O	Ca	Ti	Mn	Fe
1	3.42	—	—	2.02	94.56
2	2.00	1.52	2.55	4.92	89.01

材料组织结构

通过控轧控冷工艺调控钢材的组织结构,是热轧高强钢提高强度的重要途径。本钢产高强车轮钢BG590CL室温下组织为铁素体与珠光体(F+P),在现有钢材成分体系及轧制工艺不变的条件下,通过小幅调整冷却方式与卷取温度,可改变珠光体组织片层的间距,从而影响钢材的强度。钢材卷取后温度下降缓慢,相当于一次自回火过程;钢材生产过程中的卷取温度对焊接接头组织具有重要影响,当钢材焊接时,在焊接热循环的作用下,热影响区中峰值温度介于母材回火温度与加热时珠光体向奥氏体转变的起始温度 A_{c1} 之间,相当于经历一次温度高于原始回火温度的二次回火过程,最终导致该区域强度和硬度降低,即出现局部减薄现象。为减弱焊接接头减薄的程度,从材料方面考虑,建议选择合适的钢卷卷取温度。

焊接工艺因素

沿垂直焊缝方向截取矩形试样,自焊缝区向两侧母材方向每隔0.6 mm选取一个测点,每个测点检测1次,采用维氏硬度 HV_{10} 进行测试,典型测试数据见表7。可见热影响区硬度最低,焊缝、熔合区次之,母材硬度最高。在涨扩工序的拉伸变形过程中,焊接接头热影响区硬度最低,较母材先出现屈

表 7 减薄样品不同位置硬度 HV₁₀ 检验结果

位置	硬度值1	硬度值2	硬度值3	硬度值均值
焊缝、熔合区	206	208	206	206.7
热影响区1	202	201	195	199.3
热影响区2	208	204	207	206.3
母材区1	219	213	213	215.0
母材区2	218	231	230	226.3

服并发生变形；待热影响区域硬化后，变形扩展到其他部位，最终导致变形在热影响区集中，引发局部厚度减薄。解决焊接接头局部减薄问题的最优方案是对焊后工件采用整体焊后热处理，使工件性能保持一致。若不进行焊后热处理，则应优先选择能

量密度高的焊接热源，并匹配合适的焊接热输入参数，以减小焊接减薄区，从而降低轮辋成型过程中出现减薄的概率。

如图 4(a) 所示，5.5 mm 厚 BG590CL 钢样品焊接接头缺陷部位存在魏氏体组织，闪光对焊属于快热快冷的焊接过程，钢材焊接接头过热区易发生晶粒粗化形成魏氏体组织，该组织硬而脆，对焊接性能非常不利。特别在车轮边缘的焊缝处冷却速度最快，且在后续扩口、滚型和校正工序中受到反复的拉伸变形，成为最易发生开裂的部位。如图 4(b) 所示，5.5 mm 厚 BG590CL 钢中的偏析带不利于钢材的成型。

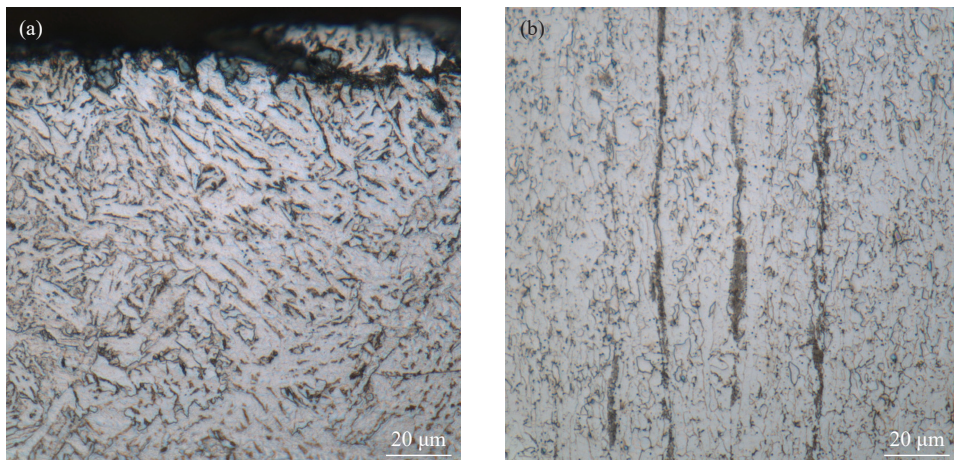


图 4 显微组织形貌: (a) 开裂轮辋焊接接头; (b) 开裂轮辋母材

焊接接头的脆化程度不仅与晶粒粗化有关，而且与沉淀强化元素的含量密切相关。对于低碳高锰经过 Nb、Ti 微合金化的高强车轮钢 BG590CL，在焊接热源的作用下，熔合区附近的母材被加热到接近熔点的高温，钢中的碳化物和氮化物几乎完全溶于奥氏体，即使冷却速度较慢，碳化物、氮化物也难以析出，而是存留在固溶体中，此过程使焊接接头的硬度提高，韧性下降。为降低粗晶区脆化造成的不利影响，焊接过程中应选择较小的焊接热输入。

成型因素

钢材在反复变形过程中，内部的位错不断累积，造成加工硬化，塑性大幅降低，从而导致变形开裂。特别是在焊接接头处，热影响区的部分晶粒在热循环过程中长大，造成组织不均匀，协调变形

能力差，该区域在反复变形后更易开裂。因此，按照传统的冷变形经验，应适当降低材料的变形速率，并在工件与模具之间采取必要的润滑措施。

其他因素

除了上述 3 个因素外，设备因素和加工因素也是导致焊接开裂的重要原因。设备因素会导致焊接时电流输入不稳定，焊接断面熔化不均匀，生产线特别是焊机应定期检修；同时，调整刮渣机参数，稳定焊后刮渣性能。加工因素中，滚圆时两端面距离过大会导致焊后内应力增大（如图 5(a) 所示），建议进一步减小滚圆后两端的间隙，并持续提高、稳定装配精度；部分板材剪切、滚圆成型后，两端面虽可闭合，但一侧空隙过大（如图 5(b) 所示），在焊接时易成为薄弱区，进而在后续成型工序中发

生开裂；焊前需进行除锈处理（如图 5(c) 所示），以提高焊接质量。此外，钢卷在钢厂轧制时，边部冷却速度较快，缺陷率较高，根据供货经验，建议切除钢卷头尾和边部后再进行生产。

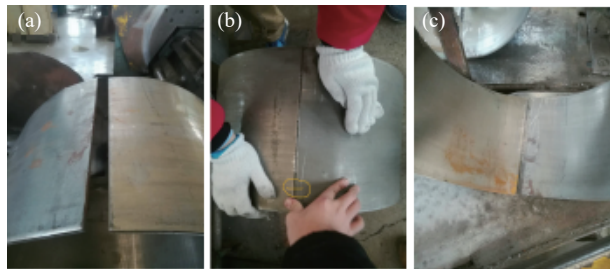


图 5 其他因素示意图: (a) 端面距离过大; (b) 装配精度欠佳; (c) 焊前除锈处理

结束语

(1) BG590CL 钢轮辋焊接接头中粗大的魏氏体组织降低了焊接接头的强韧性，恶化了轮辋焊接接头部位的成型能力；钢中存在的 1.0 级粗系 B 类夹杂物促进了轮辋焊接接头部位成型过程中的断裂；钢中的偏析带不利于钢材的成型。

(2) 焊接接头减薄的主要原因是焊接热影响区

硬度下降。为防止焊接接头脆化和减薄，应选择合适的焊接热输入。

(3) 生产线特别是焊机应定期检修；提高焊前装配精度，并在轮辋成型过程中，确保工件与模具之间润滑良好。

参考文献

- [1] 杨维宇, 康利明, 勤牧, 等. 高强韧性轮辋用 490CL 车轮钢焊接开裂失效分析. 包钢科技, 2024, 50(1): 41
- [2] 张智刚, 宿成, 杨维宇, 等. 420 MPa 级轮辋用钢焊接变形失效原因浅析. 包钢科技, 2023, 49(5): 61
- [3] 何晓波, 刘艳玲, 万国喜. 650 MPa 轻量化轮辋用钢焊接性能研究. 河南冶金, 2024, 32(1): 5
- [4] 张明博, 刘效云, 高建国, 等. C380CL 钢车轮焊缝开裂原因分析. 上海金属, 2019, 41(3): 34
- [5] 苏晨, 闫君杰. 闪光对焊工艺参数对轮毂用钢 RS590CL 闪光对焊接头性能的研究. 热加工工艺, 2017, 46(23): 73
- [6] 韩宇, 姜文超, 刘志璞. RS590 轮辋用钢焊缝开裂原因分析. 金属世界, 2021(5): 72

作者简介: 修立民 (1992—), 男, 黑龙江绥化人, 工程师, 硕士, 2018 年毕业于大连交通大学材料科学与工程专业。主要研究方向: 钢铁材料物理检测、显微组织及性能分析。通信地址: 辽宁省本溪市本钢厂区氧气路 6 号本钢技术中心; E-mail: 2209612470@qq.com。