

非标异型紧固件 ML08Al 钢铆钉开裂原因分析和工艺改进

赵满堂 陶群南 陈永峰 陆继欢

(芜湖新兴铸管有限责任公司研究院, 芜湖 241002)

摘要 分析表明非标异型紧固件 ML08Al 钢铆钉开裂由于材料原始屈服强度偏高、材料塑性差是造成铆钉翻边开裂的主要原因。通过优化成分控制在 0.04% ~ 0.06% C, $\leq 0.05\%$ Si, 0.30% ~ 0.35% Mn, Ti 含量由 0.021% 降至 0.001%, 冶炼过程 [N] 控制小于 30×10^{-6} , 使屈服强度由 260 ~ 264 MPa 降至 219 ~ 226 MPa, 降低材料加工硬化率, 获得更高的塑性应变能力, 保证铆钉深加工质量要求, 百吨铆钉开裂率由原来的 8% 降低至 0.33% 左右。

关键词 ML08Al 钢 非标异型紧固件 铆钉开裂 力学性能 材料塑性

Cause Analysis on Cracking of ML08Al Steel Rivets for Non-Standard Special-Shaped Fasteners and Process Improvement

Zhao Mantang, Tao Qunnan, Chen Yongfeng and Lu Jihuan
(Research Institute, Wuhu Xinxing Pipe Casting Co Ltd, Wuhu 241002)

Abstract The analysis shows that cracking of steel ML08Al rivets with non-standard special-shaped fasteners is mainly caused rivet flanging by the high original strength and the poor plastic shape of the material. By optimizing the composition control in the range of 0.04% ~ 0.06% C, $\leq 0.05\%$ Si, 0.30% ~ 0.35% Mn, decreasing Ti content from 0.021% to 0.001% and the [N] in the smelting process control less than 30×10^{-6} , the yield strength of steel decreases from 260 ~ 264 MPa to 219 ~ 226 MPa and the work hardening rate of the material can be effectively reduced, to obtain a higher plastic strain capacity and ensure the quality requirements of rivet deep processing, 100 tons of rivet cracking rate from the original 8% reduces to about 0.33%.

Material Index ML08Al Steel, Non-Standard Special-Shaped Fastener, Rivet Cracking, Mechanical Properties, Material Plasticity

ML08Al 属于紧固件系列品种中的低碳冷锻钢, 主要用作 4.8 级以下标准件及各种非标异型产品, 主要生产螺栓、半空心铆钉、实心铆钉、螺母、自攻钉、非标五金配件等产品。由于钢种碳含量、硅含量较低, 故硬度较低, 且具有较高的塑性变形性能。因此, 在生产普通螺栓、螺母时不需要进行球化工艺处理可直接用作 1/3 冷锻成型^[1-2]。产品在做非标异型紧固件时由于金属变形量大, 变形速度快, 往往需要经球化工艺处理后冷锻成型, 在保证产品合适的力学性能时, 还需保证其优良的冷锻性能^[3]。

1 空心铆钉生产工艺流程和分析

空心铆钉生产工艺流程如下: $\Phi 6.5$ mm 原材料 → 机械除皮、磷化、皂化、烘干 → 再结晶退火 → 粗拔 → 精拔至 $\Phi 4.1$ mm → 多工位冷锻机上挤压成型 (包括剪切下料、镦头、冲空心) → 表面镀镍 (镀锌) → “打花” 试验 → 包装入库。

“打花” 试验 (即模拟空心铆钉铆接状况的试验), 铆钉空心部位受压产生膨胀和翻边, 其翻边过程类似于薄板的扩孔及翻边成型过程, 其中空心部

位的外缘受力及变形最大。

从生产现场所取铆钉翻边开裂样品宏观形貌如图 1 所示。从图 1 可以看出, 翻边帽头处存在开裂现象, 针对开裂样品通过体视显微镜观察, 与翻边裂开相对应的杆部表面无裂纹、划伤等缺陷, 说明开裂不是由于表面缺陷所引起。

对开裂试样进行非金属夹杂物检测评级, 检测结果如表 1 所示, 从表 1 可见, 非金属夹杂物控制正常。

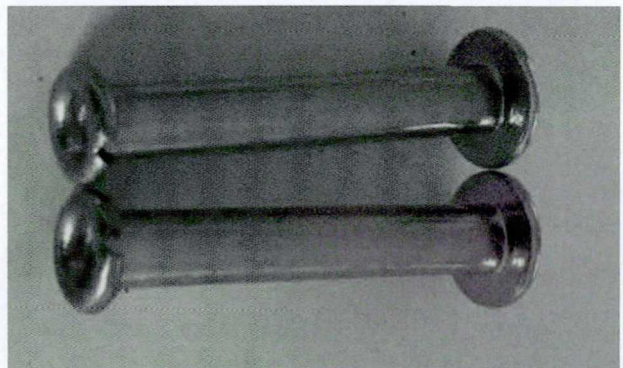


图 1 ML08Al 钢开裂铆钉形貌
Fig. 1 Morphology of ML08Al steel cracking rivets

表 1 ML08Al 钢开裂铆钉非金属夹杂物检测/级
Table 1 Detection of non-metallic inclusions in ML08Al steel cracking rivets /rating

| 开裂试样 | A | | B | | C | | D | | Ds |
|------|-----|-----|-----|---|---|---|-----|-----|-----|
| | 细 | 粗 | 细 | 粗 | 细 | 粗 | 细 | 粗 | |
| 1 | 0.5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| 2 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |

将原材料及开裂样品截取 25mm 长试样,在光学显微镜下进行显微组织分析,经过检验原始材料显微组织为正常的铁素体+珠光体,晶粒度 8.5 级,如图 2 所示;翻边开裂铆钉金相组织 F+球化体,球化体晶粒分布均匀,无异常组织存在,如图 3 所示。因此说明球化处理不是开裂的主要影响因素,球化处理后材料的塑性成型性得到显著提升。

通过分析,可确定材料组织及夹杂物不是材料铆钉翻边开裂的主要原因。而材料的成形性能指标一般有两个:(1)加工硬化指数即 n 值;(2)塑性应变比 r 值。 n 值取决于材料化学成分和晶粒度(晶粒大 n 值高)并且与材料屈服强度成反比; r 值取决

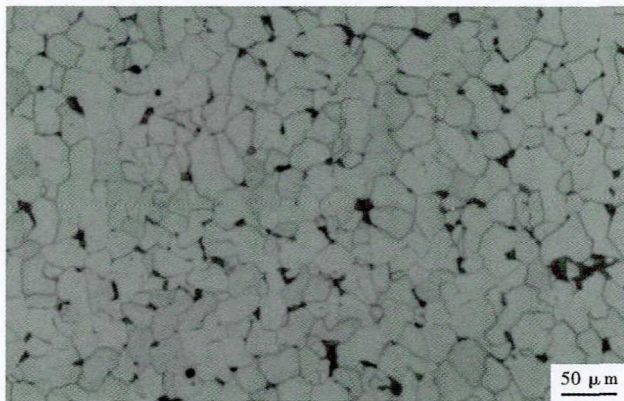


图 2 Φ6.5 mm ML08Al 钢热轧态组织
Fig. 2 Hot-rolled structure of Φ6.5 mm steel ML08Al

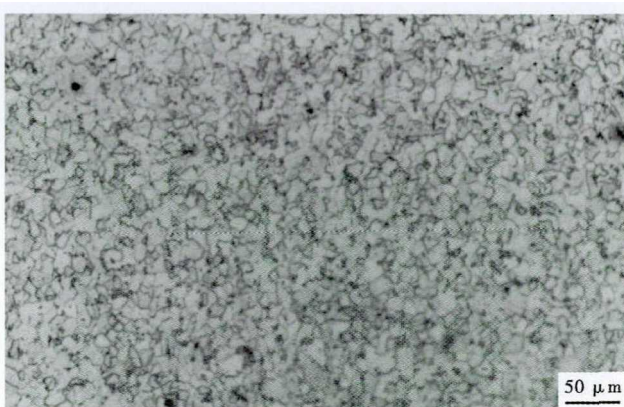


图 3 ML08Al 钢开裂铆钉球化态显微组织
Fig. 3 Spheroidized structure of ML08Al steel cracking rivet

于材料中 {111} 织构含量。

2 优化设计试验及分析

2.1 ML08Al 钢生产工艺流程及关键技术参数

生产工艺流程:120 t BOF→120 t LF 精炼→180 mm×180 mm 连铸坯→高线步进梁式加热炉→轧制→精整→入库。

2.1.1 冶炼过程控制

转炉冶炼严格控制终点成分: $C \leq 0.06\%$ 、 $P \leq 0.020\%$,出钢挡渣操作,避免下渣回 P,出钢时向钢包中加入低碳锰铁 1.9 kg/t,出钢加铝锭 40 kg/炉,炉后喂铝线 200~300 m 进行深脱氧,确保精炼进站 0.050%~0.070% Al,为 LF 冶炼过程创造良好条件;精炼全程进行底吹氩操作,精炼加石灰 300~500 kg,30~50 kg 铝粒、20 kg 碳化硅强化渣面脱氧,保证白渣时间大于 15 min,出站前钢水中 Al 不低于 0.040%,酸铝比大于 85%,软吹时间大于 15 min,促使颗粒夹杂的上浮,提高钢水的纯净度。中间包烘烤时间大于 180 min,开浇前做好中间包及包盖密封,钢包套管密封、中间包气体置换、浸入式水口密封等,结晶器液面波动控制在 ± 5 mm 内,中间包过热度控制在 20~45℃,结晶器电磁搅拌参数 $I=300$ A, $f=4$ Hz;拉速控制在 1.4 m/min,二冷采取弱冷方式,比水量控制在 0.6~0.7 L/kg,通过上述工艺控制,获得良好的表面质量。

2.1.2 轧制过程控制

对入炉坯料进行检验及时剔除缺陷坯料。轧制前检查轧辊、轧槽、导卫质量,对过程轧件 2# 剪切样、3# 剪切样在线酸洗检查表面质量,杜绝盘条产生折叠、发纹及划伤等表面缺陷。轧制采用控轧控冷工艺,严格控制各段温度:控制开轧温度 (1000 ± 10)℃,精轧入口温度 (920 ± 10)℃,减定径入口温度 (900 ± 10)℃,吐丝温度 (880 ± 10)℃,保温罩全部关闭,风机全部关闭,风冷线通过延迟缓冷工艺获得均匀的铁素体+珠光体组织。

2.2 ML08Al 钢成分优化设计及工艺实践

由于铆钉材料成型的特殊性,前期成分设计中添加微量合金化元素 Ti 拟对间隙氮原子进行固化,结果表明未达到理想效果,因此针对铆钉深加工用材料成分进行优化设计,优化前后成分控制如表 2 所示。优化设计后去除 Ti 元素,将 0.05%~0.08% C 调整到 0.04%~0.06% C、 $\leq 0.08\%$ Si 调整到 $\leq 0.06\%$ Si、0.35%~0.45% Mn 调整到 0.30%~0.35% Mn。

表2 优化前后 ML08Al 钢的化学成分 / %
Table 2 Chemical composition of ML08Al steel before and after optimization / %

| 工艺 | C | Si | Mn | P | S | Al | Ti | O | N | |
|-----|----|-------------|-------|-------------|---------|---------|---------------|---------------|-------------------------|-------------------------|
| 优化前 | 内控 | 0.05 ~ 0.08 | ≤0.08 | 0.35 ~ 0.45 | ≤0.030 | ≤0.015 | 0.025 ~ 0.050 | 0.015 ~ 0.030 | ≤30 × 10 ⁻⁴ | ≤60 × 10 ⁻⁴ |
| | 实际 | 0.08 | 0.078 | 0.38 | 0.012 2 | 0.003 8 | 0.057 | 0.0209 | 20.1 × 10 ⁻⁴ | 55.8 × 10 ⁻⁴ |
| 优化后 | 内控 | 0.04 ~ 0.06 | ≤0.06 | 0.30 ~ 0.35 | ≤0.020 | ≤0.015 | 0.025 ~ 0.050 | - | ≤30 × 10 ⁻⁴ | ≤30 × 10 ⁻⁴ |
| | 实际 | 0.06 | 0.043 | 0.33 | 0.008 4 | 0.002 3 | 0.029 | 0.0014 | 19.2 × 10 ⁻⁴ | 28.8 × 10 ⁻⁴ |

表3 优化前后 ML08Al 钢 Φ6.5 mm 热轧盘条力学性能
Table 3 Mechanical properties of Φ6.5 mm hot-rolled wire rod of ML08Al steel before and after optimization

| 工艺 | 屈服强度/ MPa | 抗拉强度/ MPa | 断面收缩率/ % |
|-----|--------------|--------------|-------------|
| 优化前 | 263 | 373 | 66 |
| | 264 | 372 | 68 |
| | 260 | 371 | 70 |
| 优化后 | 217 | 349 | 76 |
| | 226 | 345 | 75 |
| | 219 | 356 | 72 |
| | 221 | 341 | 73 |

通过优化成分设计后冶炼过程出钢时向钢包中加入低碳锰铁 1.9 kg/t 调整到 1.5 kg/t, 保证出钢完 Mn 含量在 0.25% ~ 0.30%, 防止 Mn 含量超要求, 成分控制如表 2 中优化后实际控制成分; 生产的 180 mm × 180 mm 小方坯经过轧制成 Φ6.5 mm 规格热轧盘圆, 经过检测, 抗拉强度平均降低 20 ~ 25 MPa, 屈服强度平均降低 35 ~ 40 MPa, 断面收缩率提升 7.3% 左右, 数据见表 3 所示。试验生产的 Φ6.5 mm 规格热轧盘圆客户经过拉拔机械除皮、磷化、皂化、烘干拉拔至 Φ4.1 mm 后生产铆钉。经客户使用统计百吨铆钉开裂率由原来的 8% 降低到 0.33% 左右, 说明材料的屈服强度高是铆钉翻边开裂的主要原因, 而钢中 [N] 检测 55.8 × 10⁻⁶, [N] 偏高促进了材料的加工硬化, 增加了铆钉开裂的风险。

对于 ML08Al 钢除了间隙原子 (C、N) 对 n 值影响大, 所有固溶元素都降低 n 值, 首先是 Si, 其次是 Mn。碳含量及其在钢中存在的形式决定材料的力学性能, 因为渗碳体会阻碍铁素体机体变形。随着钢中固溶的碳增加, 会使得材料中 {111} 织构密度降低, 导致 r 值下降。随着碳含量降低, 特别是 [C] < 0.01% 时, 材料的 r 值急剧上升。国外的研究和生产实际都表明, 低碳深冲用钢热轧时采用“三高一低”制度, 即高的加热温度、开轧温度、中轧温度和低的吐丝温度 (对不进行再结晶退火的应高的吐丝温度并缓冷) 以防止 AlN 析出, 为后续再结晶退火获得强 {111} 织构做准备。

ML08Al 钢经拉拔后进行再结晶退火, 通常采用两段退火, 在 550 ~ 600 °C 保温 4 h, 使得钢中 Al、N

原子在位错处析出 AlN, 然后加热到 680 ~ 700 °C 保温 72 h, 这些析出的 AlN 能够促进晶面原子 {111} 织构优先发展, 从而获得高 r 值; 保温结束后, 应缓慢冷却至 200 °C 以下, 以保证碳原子尽可能以渗碳体形式存在。在铝镇静深冲用钢中, AlN 是织构控制剂, 对获得高 r 值至关重要。铝元素有细化晶粒的作用, 并能减少偏析, 改善塑性。如果钢中铝含量超过 0.050% 使得钢液流动性变差, 钢液中的有害物质非金属夹杂物上浮受到阻碍, 导致产品冷镦成型性能降低, 不利于材料深加工。经实验, 酸溶铝与成品钢中氧含量存在极大关系^[4], 为有效去除钢中的氧, 铝的适宜加入量为 0.6 ~ 0.9 kg/t^[5], 钢中酸溶铝含量控制在 0.020% ~ 0.035% 比较合理。

3 结论

(1) ML08Al 钢优化后化学成分控制在 0.04% ~ 0.06% C、≤0.05% Si、0.30% ~ 0.35% Mn, 冶炼过程 [N] ≤ 30 × 10⁻⁶。可有效降低材料综合力学性能, 降低加工硬化率, 保证铆钉深加工的工艺要求。

(2) 再结晶工艺应控制 550 ~ 600 °C 保温 4 h, 然后加热到 680 ~ 700 °C 保温 72 h, 促使 Al、N 原子在位错处析出 AlN, 获得更高的塑性应变能力。

参考文献

- [1] 石敏, 祝俊飞. 降低 ML08Al 低碳冷镦钢盘条热轧强度的工艺优化[J]. 山西冶金, 2018, 21(6): 21-22.
- [2] 孙彩凤, 靳国兵, 李朝辉, 等. ML08Al 冷镦开裂原因分析及控制措施[C]//第八届(2011)中国钢铁年会论文集, 2011 年卷. 北京: 中国工业出版社, 2011: 518-524.
- [3] 高永彬, 王庆贤, 汪景华. ML08Al 冷镦盘条试制[J]. 金属制品, 2006, 32(4): 30-31.
- [4] 刘小平, 刘季成. 铆螺钢丝镦头开裂原因分析[J]. 金属制品, 1998, 8(6): 30-31.
- [5] 颜根发, 陈亮, 殷朝海. 自攻螺钉专用冷镦钢的开发[J]. 钢铁, 1997, 1(10): 12-14.

赵满堂(1987-), 男, 室主任, 2012 年兰州理工大学(本科)毕业, 产品研发和科技创新。E-mail: zhaomt68@126.com

收稿日期: 2020-10-10