

35CrMnSiA 厚壁件热处理性能不合格因素及改进措施研究

吴鹏¹ 郝钢² 刘路¹ 李松成¹ 任铁刚¹

(1 辽沈工业集团有限公司 辽宁 沈阳 110045; 2 陆军装备部驻沈阳地区第二军事代表室 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 文章主要研究了为满足某工件日益提高的性能要求, 解决工件热处理后性能不达标的问题。通过对 35CrMnSiA 热处理过程的工艺研究, 分析在热处理加工过程中, 不同热处理方式与不同热处理参数对工件热处理后性能的影响, 并针对产品外形结构特点, 改变传统工艺路线, 通过改变装炉方式、加热流程及冷却方式等办法, 提高零件淬火后的淬透层深度与淬火质量一致性, 使 35mm 等效厚度的工件获得 $R_{p0.2} \geq 1280\text{MPa}$ 、 $A \geq 10\%$ 的性能指标。

关键词: 35CrMnSiA; 厚壁件; 热处理; 高性能指标; 改进措施

0 引言

随着装备技术的日益发展, 工件基体性能要求日益提升。在实际生产过程中, 工件基体性能存在无法达到设计要求的情况。

某 35CrMnSiA 筒型工件的厚度为 35mm, 其热处理后力学性能要求为: $R_{p0.2} \geq 1280\text{MPa}$ 、 $A \geq 10\%$ 。热处理过程中, 每淬火炉装炉量 ≤ 40 件, 每回火炉装炉量 ≤ 80 件, 回火后的工件 100% 进行 1 点洛氏硬度检测, 并在 1 个工件上圆周相隔 120° 位置取 3 个力学性能试样 (其中 1 个为备用试样)。在完成某回火炉工件热处

理后, 选送硬度值最高和最低的工件各 1 件进行力学性能试验过程中, 发现 4 号工件 (硬度值为 47HRC) 的一个试样的力学拉伸性能为: $R_{p0.2}=1232\text{MPa}$ 、 $A=10\%$, 未满足力学性能要求。

1 原因分析

建立工件力学性能不合格故障树 (图 1)。

工件力学性能不合格故障树的建立从工件质量问题和力学性能检测过程的问题两个方面因素进行分析。

1.1 工件质量问题方面

工件质量问题存在 4 种可能情况, 即硬度检测不准

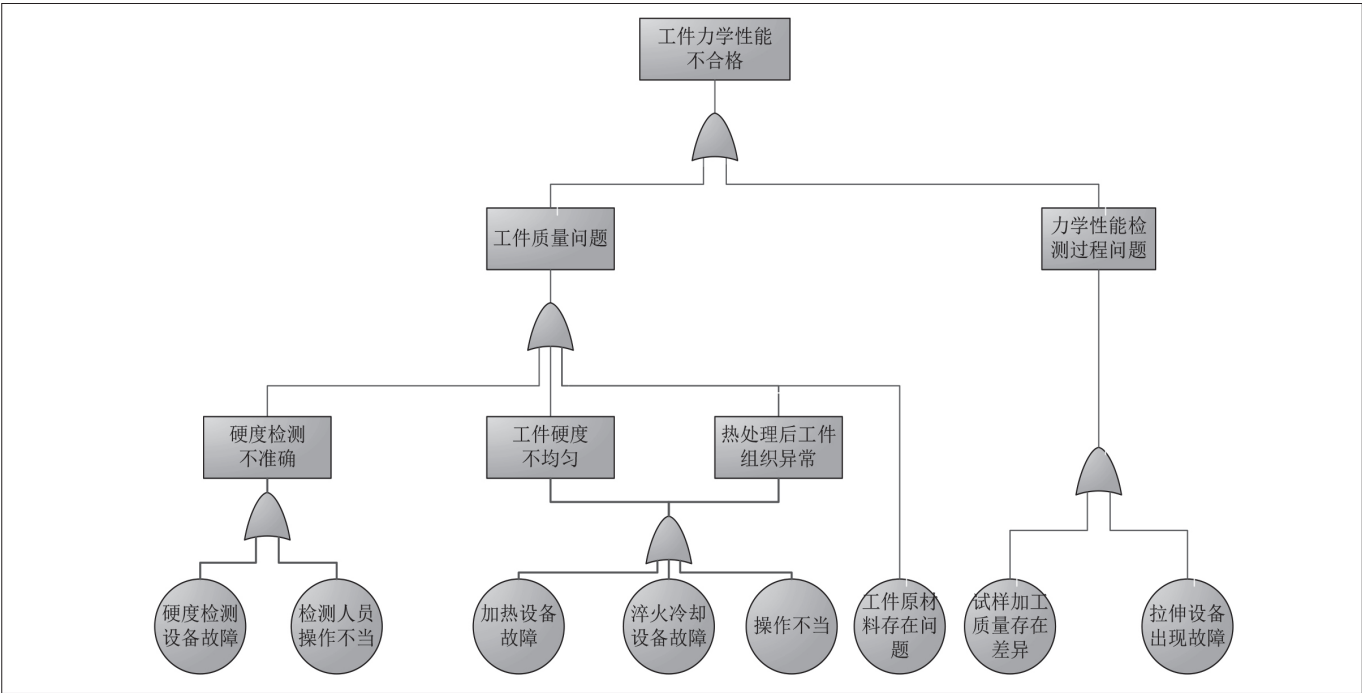


图 1 工件力学性能不合格故障树

确、硬度不均匀、热处理后工件组织异常和工件原材料存在问题。

1.1.1 硬度检测不准确

在工件硬度检测过程中，由于测量误差或失误，造成工件的实际硬度与测量硬度偏差大，影响工件的力学性能。

1.1.2 工件硬度不均匀

在热处理加工过程中，由于生产过程控制不到位，影响组织转变或组织晶粒粗大，造成工件硬度不均匀，当试样截取部位处于硬度值低的位置，造成力学性能不合格。

1.1.3 热处理后工件组织异常

热处理后工件组织异常，非该材料热处理后正常组织（回火屈氏体 + 少量铁素体），造成力学性能不合格。

1.1.4 工件原材料问题

工件原材料成分不合格（如 C 含量偏高或偏低）或原材料存在微观缺陷，可导致工件热处理后性能不合格。

1.2 力学性能检测过程方面

力学性能检测过程的问题存在 2 种可能情况，即试样加工质量存在异常和拉伸设备出现故障。

1.2.1 试样加工质量存在异常

试样在完成机械加工后，试棒表面有毛刺、车制接刀痕或试棒尺寸不合格等缺陷，导致性能试样过程中试棒外断或断裂形貌不满足塑性变形规律。

1.2.2 拉伸设备出现故障

在拉伸试样过程中，拉伸设备故障可能造成力学性能结果的异常。

2 原因排查

通过分析故障树，确定有 8 项底事件会造成工件力学性能异常，逐项进行排查，其结果如下：

2.1 硬度检测不准确排查

2.1.1 硬度检测设备故障

核查洛氏硬度计（HR-150A）检定证书，同时校对洛氏硬度板，硬度检测设备未见异常。

2.1.2 检测人员操作不当

核查检测人员资质，检测人员经培训合格持证上岗，且在该岗位操作几年，经验较为丰富，现场考核操作过程，其操作标准度较高。

将 4 号工件在理化实验室进行对比分析，采用布氏硬度和洛氏硬度检测，并与热处理过程中测量数值进行对比，硬度值存在一定偏差，偏差值不大，测量结果见表 1。

2.2 工件硬度不均匀、组织异常排查

收集 4 号工件力学性能不合格试样残余部分，在试样装夹处取样进行金相组织分析，分析结果为回火屈氏体和少量铁素铁，为该工件热处理后的正常组织。其组

表 1 布氏硬度与洛氏硬度测量值对比

生产现场检测	洛氏硬度 HRC	47.2	47	47
理化实验室检测	洛氏硬度 HRC	47.4	46.8	47.2
	布氏硬度 HB (d)	2.76	2.83	2.79

织状态如图 2、图 3 所示。

切取该工件合格试样和异常试样拉伸端面进行维氏硬度比对，检测结果显示硬度偏差较大，有阴阳面现象，由此可推断生产过程存在异常，导致工件硬度不均，局部有软点，当力学性能取样部位在软点的位置，其力学性能必然降低。造成工件硬度不均匀的生产过程主要有以下三项底事件。

2.2.1 加热设备

核查台车式电阻炉检测报告，设备在检定周期范围内，炉温偏差在 5℃ 范围，满足三类热处理炉 ±10℃ 的要求。

核查井式回火电阻炉检测报告，设备在检定周期范

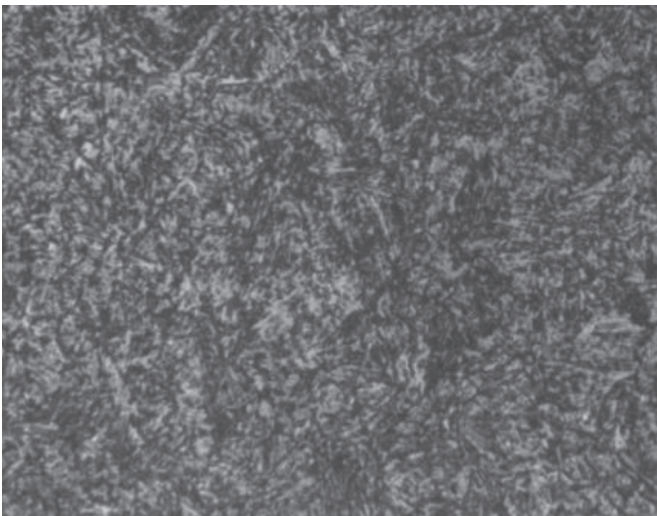


图 2 1# 试样 500× 金相组织

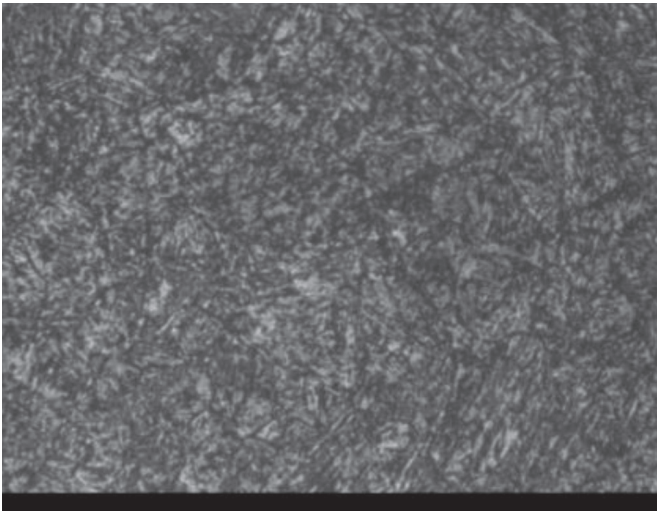


图 3 2# 试样 500× 金相组织

围内，该炉炉温整体偏高 20℃，不满足三类热处理炉 ±10℃的要求。

2.2.2 淬火冷却过程

淬火操作时，由 1 名操作者将淬火炉门升至一定高度，1 名操作者用炉钩将单发工件钩到炉门口，3 名操作者手拿铁钳按顺序逐个夹持工件迅速走到淬火油槽边放入油筐内淬火，依次循环至完成工件入油，整个夹持过程大约 2min，同时 1 名操作者操作吊车，使油筐在淬火油内上、下移动。油筐为长筒形嵌孔结构，工件入油筐内相互之间接触、贴合，贴合位置与淬火油接触、交换能力不足，冷却速度不够，工件硬度局部位位置降低，导致该部位力学性能降低。

2.2.3 操作过程

淬火油槽为淬火加热设备东侧油槽，为热处理工段早期建造和使用设备，油槽深度为约 3m，槽内 3.6m³ 淬火油，能够满足批量生产时冷却要求，但其搅拌、循环能力较弱，淬火筐上下提升缓慢且幅度小时，冷却能力降低。

在上述三种因素共同影响下，任意抽取 8 炉中任意 1 炉中的 10 个工件进行试验，热处理参数为淬火温度 900℃，保温 70min；回火温度 450℃（炉膛实际温度 470℃），保温 140min，热处理后进行布氏硬度检测，各工件均进行三点检测，硬度整体偏低，单发工件硬度最大偏差为 0.07mm，选取 2 发布氏硬度最低工件进行力学性能检测，两发工件上各截取 3 个试样，力学性能不能满足图样规定 ≥ 1280MPa 要求，未能准确复现出该现象，但趋势已有显现。

通过上述复现趋势，可认定回火炉超温为主因，淬火冷却过程和操作过程淬火筐上下移动幅度较小为次因，导致工件硬度不均匀，出现个别工件力学性能不合格。

2.3 工件原材料问题排查

利用收集的该发工件力学性能不合格试样残余部分，取样进行化学成分分析，各元素含量均在标准规定范围内，可排除该底事件。检测结果见表 2。

2.4 试样加工质量存在异常排查

收集并拼接该发工件力学性能不合格试样，通过观察试样外观未见车制接刀痕或划刀痕等异常现象，且试样断裂形貌满足塑性变形规律，同时对该试样维氏硬检测推算的力学性能理论值与实际值吻合，可排除该底事件。

表 2 试样化学成分检测结果

项目	C	Si	Mn	Cr	P	S
资料规定	0.32 ~ 0.39	1.10 ~ 1.40	0.80 ~ 1.10	1.10 ~ 1.40	≤ 0.020	≤ 0.020
试验结果	0.33	1.17	0.84	1.13	0.011	0.0040
	0.33	1.18	0.85	1.13	0.012	0.0038

2.5 拉伸设备出现故障排查

现场查看理化实验室拉伸试验过程记录曲线，进行力学性能检测的 4 发工件的 8 个试样拉伸曲线规律，同时理化实验室进行其他检测试样的检测工作，未见异常情况，可排除该底事件。

3 排查结论

经问题分析和排查，工件力学性能不合格产生的主要因素是加热设备故障超温 20℃，次要因素是淬火冷却过程和操作过程淬火筐上下移动幅度较小，淬火冷速降低，产品相互接触的部位出现局部软点。

4 工艺提升研究

为有效改善工件硬度不均现象，保证工件硬度一致性，确保选取工件的力学性能能够满足图样要求且能够代表本热处理批质量，对工件热处理工艺进行攻关，开展以下几组工艺试验。

(1) 抽取 8 炉中任意 1 炉中的 20 件工件，先进行正火处理，采用 870℃，保温 90min，细化晶粒，优化工件组织。

抽取其中 10 个工件，热处理参数为淬火 900℃，保温 60min；回火 400℃，保温 140min，采用装筐整体淬火方式，用循环搅拌力度大的淬火油槽进行冷却（简称“大油槽”），热处理后进行布氏硬度检测，HB(d)=2.74 ~ 2.82mm。

选取硬度最低的 1[#] 与 2[#] 工件进行力学性能检测，Rp0.2 为 1367 ~ 1429MPa、A 为 11% ~ 11.5%，满足图样规定 Rp0.2 ≥ 1280MPa、A ≥ 10% 的要求，检测结果见表 3。

(2) 继续抽取 8 炉中任意 1 炉 30 发工件，先正火处理，采用 870℃，保温 120min，热处理参数为淬火 900℃，保温 120min；回火 400℃，保温 120min，回火后水冷，采用装筐加热、一体淬火的方式进行淬火处理，使用大油槽进行淬火冷却，用于验证隔离工件工艺方案可行性，热处理后布氏硬度检测结果，HB(d)=2.69 ~ 2.78mm。

选取硬度最低 2 件工件进行力学性能检测，Rp0.2 为 1372 ~ 1456MPa、A 为 10.5% ~ 11%，满足图样规定 Rp0.2 ≥ 1280MPa、A ≥ 10% 的要求，检测结果见表 4。

(3) 选取 40 件未经热处理的工件，先正火处理，采用 870℃，保温 120min；细化晶粒，优化工件组织。

抽取其中 10 件工件，热处理参数为淬火 900℃，保温 120min；回火：380℃，保温 120min，采用装筐整体淬火方式，用循环搅拌力度大的淬火油槽进行冷却，热处理后进行布氏硬度检测，HB(d)=2.74 ~ 2.82mm。

选取硬度最高和最低工件各 1 件进行力学性能检测，Rp0.2 为 1350 ~ 1458MPa、A

表 3 第一组试验机械性能检测结果

力学性能	HB(d)			
	2.80mm		2.82mm	
Rp0.2/MPa	1417	1429	1380	1367
A/%	11	11	11	11.5

表 4 第二组试验机械性能检测结果

力学性能	HB(d)			
	2.75mm		2.78mm	
Rp0.2/MPa	1456	1438	1410	1372
A/%	11.0	10.5	10.5	10.5

表 5 第三组试验机械性能检测结果

力学性能	HB (d)			
	2.74mm		2.82mm	
Rp0.2/MPa	1440	1458	1350	1375
A/%	10.0	10.0	10.5	11.0

表 6 第三组试验验证生产机械性能检测结果

力学性能	HB (d)			
	2.82mm		2.69mm	
Rp0.2/MPa	1408	1414	1422	1428
A/%	10.0	10.5	12.0	10.0

为 10.0% ~ 11.0%，满足图样规定 $Rp0.2 \geq 1280MPa$ 、 $A \geq 10\%$ 的要求，检测结果见表 5。

将剩余 30 件工件，按上述热处理参数和淬火方式进行试验，模拟批量生产，热处理后进行布氏硬度检测， $HB(d)=2.69 \sim 2.82mm$ 。

选取硬度最高和最低工件各 1 件进行力学性能检测， $Rp0.2$ 为 1408 ~ 1428MPa、 A 为 10.0% ~ 12.0%，满足图样规定 $Rp0.2 \geq 1280MPa$ 、 $A \geq 10\%$ 的要求，检测结果见表 6。

5 结语

经过上述工艺提升试验，对于 35CrMnSiA 厚壁件的热处理，通过增加 870℃ 温度，保温 120min 的正火处理，采用装筐共同加热 900℃，保温 120min 的淬火加热并一体在大油槽淬火冷却，以 380 ~ 400℃，保温 120min 回火，回火冷却采用水冷的热处理方案可以有效保证工件性能，并提高产品质量一致性。

参考文献：

[1] 薛群基. 中国工程院化工冶金与材料工程学部第六届学术会议特邀报告 [C]. 北京：化学工业出版社，2007.
[2] 程年云. 铸钢试棒力学性能不合格原因分析 [J]. 理化检验 - 物理分册，2003 (7) : 346-350.
[3] 李威，黄圣玲，等. 35CrMnSi 钢采煤机截齿的等温淬火工艺 [J]. 金属热处理，2009, 34 (10) : 80-82.

(上接第 62 页)

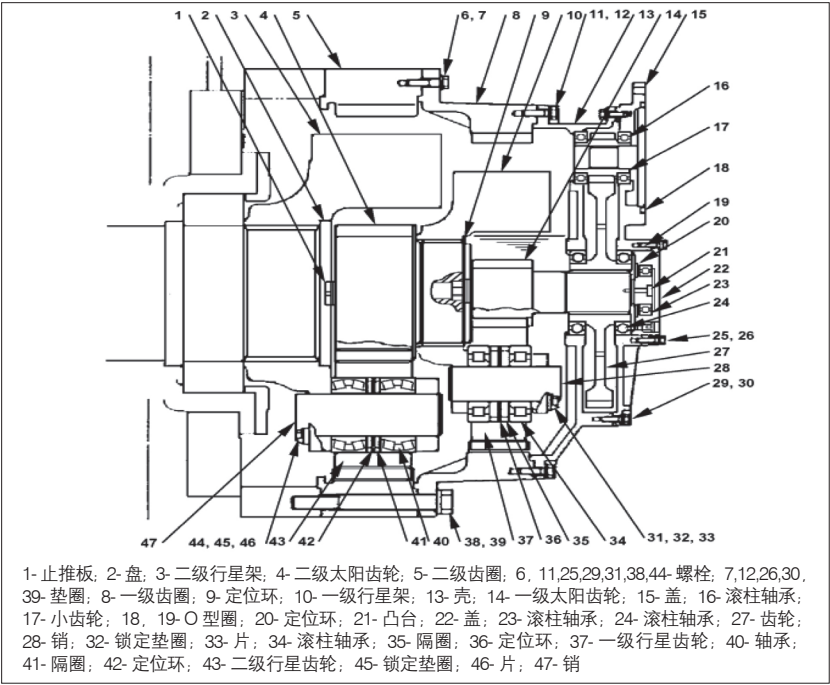


图 8 行走装置分解

二级齿圈和太阳齿轮等组成。通常行走装置的常见故障主要有渗漏油和行走减速机温升过高等。只有熟知 EX3600-6 型液压反铲行走装置结构及拆装的工艺流程，才能很好地提升检修、调试及保养的技能水平，提高设备的出动率，降低生产成本，才能给企业创造更多的价值。

参考文献：

[1] 饶振刚. 行星齿轮传动设计 [M]. 北京：化学工业出版社，2003.
[2] 唐经世. 工程机械 [M]. 北京：中国铁道出版社，1996.
[3] 黄安贻，董起顺. 液压传动 [M]. 西安：西安交通大学出版社，2005.