



合金冷镦钢 SCM435 冷镦开裂原因分析

刘荣泉, 郑福胜, 靳 君

(常熟市龙腾特种钢有限公司总工办, 苏州 215511)

摘要:某汽车配件生产商使用规格 $\phi 24$ mm 的合金冷镦钢 SCM435 热轧盘条, 开发某款形变量接近 90% 的中轴类产品。原材料经“2 拉 2 球”工艺拉拔后, 在冷镦加工时出现批量开裂, 开裂比例约 60%。经对开裂产品进行理化检测分析。分析结果表明, 冷镦开裂问题源于材料塑性不足导致的应力开裂。进一步检测发现, 用户球化退火热处理工艺不良, 球化组织仅有 4.0 级, 是导致材料塑性和韧性不足的根本原因。通过优化球化热处理工艺, 将球化退火加热段温度由 765 °C 降至 745 °C, 使材料球化组织级别达到 5.0~6.0 级, 有效改善了材料的塑性和韧性, 成功解决了产品在冷镦过程中出现开裂的质量问题。

关键词:SCM435 冷镦钢; 冷镦开裂; 应力裂纹; 球化退火

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2024-00259 **中图分类号:**TG142. 15

Cause Analysis of Cold Heading Cracking of Alloy Cold Heading Steel SCM435

Liu Rongquan, Zheng Fusheng, Jin Jun

(Chief Engineer Office, Changshu Longteng Special Steel Group Limited Company, Suzhou 215511, China)

Abstract: A certain auto parts manufacturer uses alloy cold heading steel SCM435 hot-rolled wire rod with a specification of $\phi 24$ mm to develop a mid-shaft product with a deformation rate approaching 90%. After the raw materials were drawn through a "2-draw-2-ball" process, a batch of cracks appeared during cold heading processing, with a cracking ratio of about 60%. Physical and chemical testing and analysis were conducted on the cracked products. The analysis results indicated that the cold heading cracking issue originated from insufficient material plasticity leading to stress cracking. Further inspection revealed that the user's spheroidizing annealing heat treatment process was poor, with a spheroidization structure only at grade 4.0, which was the fundamental cause of the insufficient material plasticity and toughness. By optimizing the spheroidizing heat treatment process, the spheroidizing annealing heating section temperature was reduced from 765 °C to 745 °C, bringing the material spheroidization structure grade to 5.0-6.0, effectively improving the material's plasticity and toughness, and successfully solving the quality issue of cracking during the cold heading process of the product.

Key Words: SCM435 Cold Heading Steel; Cold Heading Cracking; Stress Cracks; Spheroidizing Annealing

SCM435 钢作为一种高强度的优质合金钢, 广泛应用于冷镦产品的生产, 如汽车发动机紧固件、连接件以及超高强度级别的六角头螺栓、螺柱、内六角螺钉等关键部件^[1]。龙腾特钢生产的合金冷镦钢 SCM435 热轧盘条采用国际领先的“高温热集卷+缓冷通廊”生产工艺, 这一创新工艺不仅确保了产品表面质量的显著提升, 还使得钢材的内部组织结构更加稳定, 通条性能极佳, 完美适应了冷镦成型工艺的需求。然而, 在实际生产过程中, 尤其是在冷镦加工环节, 仍会面临一些挑战, 开裂问题便是其中之一^[2-3], 开裂不仅会导致产品质量的下降, 还会增加生产成本和制造难度, 给生产企业带来经济

损失。

某汽车配件生产商为了开发某款形变量接近 90% 的中轴类新型号产品, 采用龙腾特钢生产的合金冷镦钢 SCM435 热轧盘条, 其拉拔工艺采用标准的“2 拉 2 球”工艺, 具体流程包括: 热轧盘条 ($\phi 24.0$ mm) → 软化退火 → 酸洗磷化 → 粗拉拔 ($\phi 23.4$ mm) → 球化退火 → 精拉拔 ($\phi 23.0$ mm) → 冷镦成型。在冷镦生产过程中, 产品头部法兰面边缘出现了开裂现象, 开裂比例达到 60%。为了能帮助用户完成新型号产品的开发, 双方技术人员进行了深入的沟通与交流, 针对可能造成产品冷镦开裂的原因进行细致的分析, 如球化退火不良引起的应力

作者简介: 刘荣泉 (1981-), 男, 高级工程师, 硕士; **E-mail:** lrq@littg.cn; **收稿日期:** 2024-10-27

通信作者: 郑福胜 (1986-), 男, 工程师, 硕士; **E-mail:** neuzhengfusheng@163.com

开裂^[4]、材料表面脱碳引起的应力开裂^[5]、材料表面存在裂纹或划伤等缺陷引起的开裂^[6]、材料浅表层存在夹杂引起的开裂等^[7-8],并有针对性地制定解决措施,从根本上解决冷镦开裂这一质量问题。

1 理化检测

1.1 宏观形貌观察

对开裂样品的宏观形貌进行观察,发现产品法兰面边缘部分存在多条开裂痕迹。这些裂纹与轴线方向呈大约45°的倾斜角度,并且相邻的裂纹呈近似平行的分布形貌。为了进一步分析这些裂纹的成因,采用盐酸水溶液对开裂样品进行表面酸洗。酸洗腐蚀结果表明,在样品法兰盘区域未观察到裂纹的进一步扩展延伸,同时在样品杆部区域也未发现任何表面缺陷,样品冷镦开裂的宏观形貌如图1所示。根据裂纹的分布模式和形态特征分析,样品法兰面边缘的裂纹并非由材料表面缺陷引起,而是由于材料在冷镦成型过程中表面应力集中导致的剪切应力裂纹。



图1 SCM435钢冷镦开裂样品宏观形貌

Fig. 1 Macroscopic morphology of SCM435 steel cold heading cracking samples

1.2 化学成分检测

在开裂样品的裂纹附近截取试样,并利用直读光谱仪对所截取的试样进行化学成分检测分析。分析结果显示,开裂样品的化学成分满足《JIS G4053—2008》标准中SCM435钢成分的要求,

所有元素含量均处于中下限,表明冷镦开裂应与化学成分无关,化学成分检测数据见表1。

1.3 金相组织检验

利用线切割,截取垂直于法兰面裂纹的横截面试样进行金相检测,样品经过研磨和抛光处理后,在显微镜下观察。裂纹呈弯折形貌,裂纹开口处刚劲有力并与外表面呈45°的倾角;裂纹尾端尖锐,表明其有向内扩展的趋势,且在裂纹周边未发现非金属夹杂物的形貌,如图2(a)所示。使用硝酸酒精溶液对样品进行腐蚀后观察,发现样品表面存在轻微的脱碳现象,但在裂纹周围并未观测到脱碳组织的形貌,如图2(b)所示;经观察,冷镦开裂样品的基体组织是由粒状珠光体和粗片状珠光体混合的球化退火组织形貌,根据《GB/T38770—2020 低、中碳钢球化组织检验及评级》标准,冷镦开裂样品的基体球化退火组织应评定为4.0级,基体球化退火组织形貌如图3所示。

1.4 非金属夹杂物

利用线切割,在法兰面边缘裂纹附近截取纵截面试样,样品经过研磨和抛光处理后,在显微镜下进行观察。参照《GB/T10561—2023 钢中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验法》对样品的非金属夹杂物级别进行评定,结果显示,未在样品上发现大尺寸的非金属夹杂物,检测数据见表2。

1.5 截面硬度测试

在同批次剩余未使用的精拉拔材上截取横截面试样,样品经过研磨和抛光处理后,采用洛氏硬度B标尺进行检测,截面硬度值超过88 HRB,对于冷镦加工法兰面产品而言,这一硬度值呈偏高倾向,检测数据见表3。

2 结果分析及讨论

(1)依据前文的检测数据,裂纹仅分布产品法兰面的边缘,并且与轴向呈45°倾角;这一特定形貌揭示了裂纹可能与剪切应力存在联系;随后依据酸浸试验检测结果排除了材料表面缺陷作为裂纹成因的可能性;通过显微组织检测发现,裂纹周边未观察到非金属夹杂物,又排除了非金属夹杂物作为

表1 SCM435钢冷镦开裂样品的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of SCM435 steel cold heading cracking samples

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
JIS G4053	0.33~0.38	0.15~0.35	0.60~0.90	≤0.030	≤0.030	0.90~1.20	≤0.25	0.15~0.30
检测值	0.35	0.21	0.64	0.018	0.007	1.03	0.03	0.16

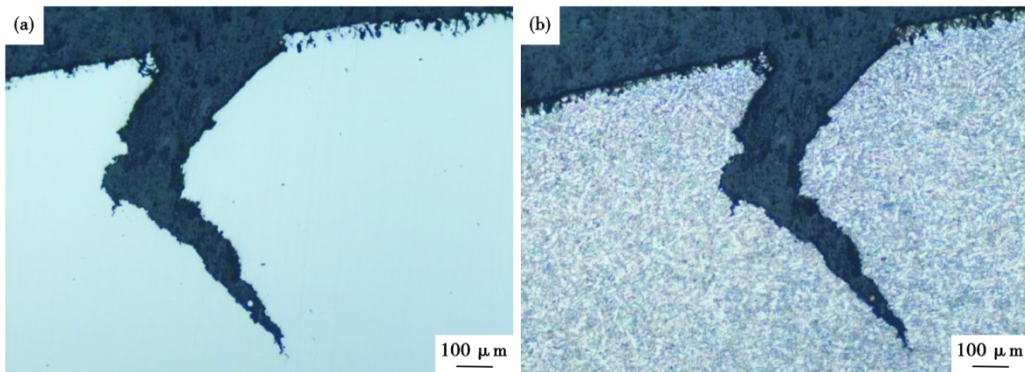


图2 SCM435 钢冷镦开裂样品:(a)裂纹周边形貌,(b)金相组织形貌

Fig. 2 Cold heading cracking sample of SCM435 steel: (a) crack peripheral morphology, (b) microstructure morphology

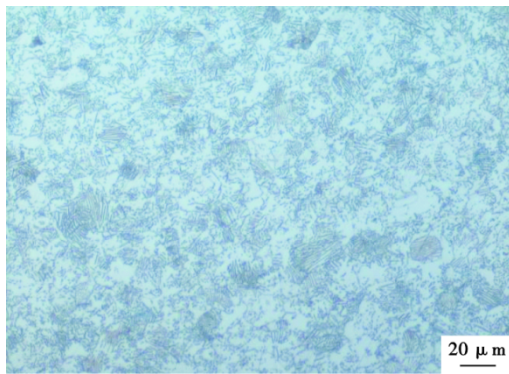


图3 SCM435 钢冷镦开裂样品的基体金相组织形貌

Fig. 3 Metallurgical structure morphology of SCM435 steel cold heading cracking samples

表2 SCM435 钢冷镦开裂样品的非金属夹杂物评级(级)
Table 2 Rating of non-metallic inclusions in SCM435 steel cold heading cracked samples

								rating	
A 细	A 粗	B 细	B 粗	C 细	C 粗	D 细	D 粗	DS	
0.5	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	
0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	

表3 SCM435 钢精拉拔材截面硬度(HRB)测试
Table 3 SCM435 steel cold drawn bar section hardness (HRB) test

检测点1	检测点2	检测点3	检测点4	检测点5	平均值
88.2	89.3	90.2	90.4	88.0	89.2

裂纹成因的可能性;进一步检测确认,虽然材料表面存在脱碳但裂纹周围没有发现脱碳组织的形貌,因此,推测裂纹应是在冷镦成型过程中出现的。由此可知,材料不存在引起冷镦开裂的表面轧制缺陷和内部冶金缺陷,最终确认产品法兰面边缘的开裂应是由于冷镦成型过程中材料塑韧性不满足形变要求而引起的切应力开裂,而材料冷镦时的塑韧性主要是通过精拉拔前的球化退火处

理来实现的。

(2)在冷镦加工过程中,材料往往要承受较大的变形量,因此,需要材料具有优异的塑性和韧性,同时硬度尽可能的低,而用户此次试制的新产品法兰面处的冷镦变形量接近90%,对材料的组织性能要求更为严苛。理化检测数据显示,尽管材料的化学成分符合标准规定,且所有元素含量均处于中下限,无异常偏高的情况,材料内部也没有发现异常的非金属夹杂物,材料表面也不存在异常脱碳,但材料在球化退火热处理后存在粗片状珠光体组织,球化组织级别仅为4.0级,同时材料横截面硬度超过88HRB,这表明材料冷镦成型前其在微观结构上是存在不足的。在《JB/T5074—2007 低、中碳钢球化体评级》标准中规定,生产冷镦变形量超过80%的产品时,球化组织级别应 ≥ 5.0 级,因此,在此次生产冷镦变形量接近90%的中轴产品时,这一组织性能将成为显著的障碍。所以推测,材料球化热处理工艺不良,导致材料球化退火处理后未获得理想的组织性能,应是造成此次冷镦过程中产品出现应力开裂的根本原因^[9-10]。这一结论不仅解释了裂纹的成因,也为解决问题提供了明确的方向。通过优化球化热处理工艺,可以解决此类裂纹的再次出现,从而提高产品的整体质量和可靠性。

3 改进措施的验证

基于前文的分析与结论,球化退火热处理后,SCM435 钢精拉拔材的基体组织中存在粗片状珠光体组织,与球化组织相比,片状珠光体组织恶化了材料的塑性和韧性,应是导致冷镦时产品出现应力开裂的根本原因。球化退火热处理后存在粗片状珠光体组织主要是两方面原因所致^[11]:一是球化

退火加热温度过高;二是在偏高的温度下长时间保温。经了解客户精拉拔前的球化退火热处理工艺为:765℃加热保温炉冷至680℃等温。依据张强、石正富、南鹏飞、田伟等人的研究结论,SCM435钢的球化退火加热温度应控制在740~760℃为佳^[12-15],因此,推测用户球化退火加热温度偏高是导致粗片状珠光体形成的主要原因。利用实验室小型电阻加热炉进行球化退火模拟试验,最终确定在其它热处理工艺参数不变的前提下,将球化退火加热温度由765℃将至745℃,所获得的球化组织最佳。随后客户采用新的球化退火工艺对尚未使用的材料进行再次生产加工。在冷镦成型生产加工前对采用新球化退火工艺加工的精拉拔材进行了取样检测。

3.1 截面硬度测试

在采用球化退火工艺优化后的精拉拔材成品上截取试样,样品经过研磨和抛光处理后,采用洛氏硬度B标尺进行检测,其截面硬度在81HRB左右,与原球化退火工艺相比,拉拔材的截面硬度得到明显改善,检测数据见表4。

表4 球化退火工艺优化后SCM435钢精拉拔材截面硬度(HRB)比对

Table 4 Comparison of section hardness (HRB) of SCM435 steel after optimization of spheroidizing annealing process and fine drawing

工艺	检测点1	检测点2	检测点3	检测点4	检测点5	平均值
优化前(球化加热温度765℃)	88.2	89.3	90.2	90.4	88.0	89.2
优化后(球化加热温度745℃)	81.7	80.4	81.2	80.8	81.4	81.1

3.2 金相组织检验

在采用球化退火工艺优化后的精拉拔材成品上截取试样,样品经过研磨和抛光处理后采用硝酸酒精溶液腐蚀,在显微镜下观察样品的金相组织形貌。检测结果显示,样品的组织结构为铁素体基体上均匀分布着球状碳化物,其球化组织级别应介于5.0至6.0级之间,与原工艺相比,材料的组织性能得到了明显的提升,金相组织形貌如图4所示。

3.3 冷镦生产验证

客户采用了经过球化退火工艺优化的精拉拔材进行冷镦成型加工,产品法兰面边缘未出现开裂

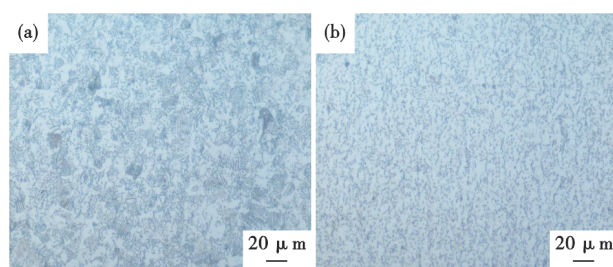


图4 球化退火工艺优化后SCM435钢精拉拔材金相组织形貌比对:(a)工艺优化前,(b)工艺优化后

Fig. 4 Comparison of metallographic structures of SCM435 steel after optimization of spheroidizing annealing process and precision drawing : (a) before process optimization, (b) after process optimization

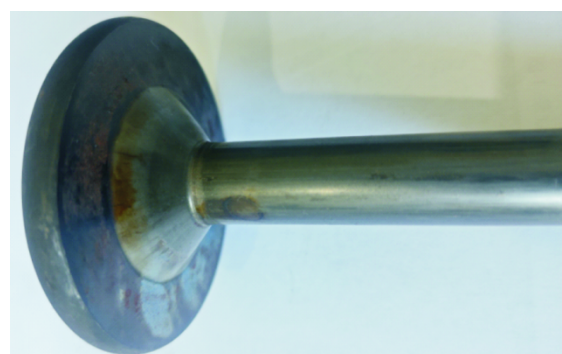


图5 球化退火工艺优化之后SCM435钢冷镦产品宏观形貌
Fig. 5 Macro morphology of SCM435 steel cold heading products after optimization of spheroidizing annealing process

现象,冷镦开裂问题得到了有效解决。目前,客户已根据优化后的工艺流程实现了连续批量生产,产品质量良好,球化退火工艺优化之后SCM435钢冷镦产品宏观形貌如图5所示,这表明该质量问题已经从根本上得到了妥善处理。

4 结论

(1)在冷镦成型过程中,产品法兰面边缘出现的开裂现象是由于材料塑性不足引起的应力开裂。其根本原因在于球化热处理工艺的缺陷,并非材料本身存在冶金或轧制方面的质量缺陷。

(2)客户将球化退火加热温度由765℃降至745℃后,精拉拔材材料的球化组织级别达到5.0~6.0级,精拉拔材的截面硬度降低至81HRB左右,在冷镦加工此型号产品时未再发现开裂现象。

(3)球化退火工艺的质量直接决定拉拔材的塑性和韧性,是产品在冷镦过程中是否会开裂的一个关键性影响因素。

参考文献

[1] 张先鸣. 我国冷镦钢的现状和发展[J]. 金属制品, 2009, 35(2): 43-47.

[2] 郑团星. 低碳冷镦钢冷镦开裂研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.

[3] 吴海浪. SCM435冷镦钢盘条生产工艺及组织性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.

[4] 柯 炜, 崔贵博, 李建开, 等. 含硼冷镦钢 10B33 冷镦开裂原因分析[J]. 金属制品, 2024, 50(3): 48-51.

[5] 苏振伟, 赵 赟, 屠兴扩, 等. SWRCH35 K 钢盘条冷镦开裂分析与工艺改进[J]. 特殊钢, 2022, 43(4): 32-35.

[6] 罗卫国, 杨瑞文, 彭光健, 等. 大规格 SCM440 钢冷镦开裂原因分析及改进[J]. 金属材料与冶金工程, 2018, 46(4): 27-32+42.

[7] 罗新中, 李富强, 朱祥睿, 等. 含硼冷镦钢 SAE10B21 镦头成型开裂原因分析[J]. 金属材料与冶金工程, 2018, 46(1): 14-18.

[8] 朱祥睿, 罗新中, 李富强, 等. SCM435 冷镦钢镦头开裂原因分析[J]. 南方金属, 2018(2): 21-23.

[9] 谷 亮. 高强紧固件冷镦开裂分析[J]. 冶金与材料, 2023, 43(2): 102-104.

[10] 李世琳, 李 龙, 李宝秀, 等. SWRCH45 K 螺栓帽头开裂原因分析: 第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集[C]. 北京: 冶金工业出版社, 2015.

[11] 孙钦鹤. 高碳铬轴承钢制轴承零件球化退火组织缺陷分析[J]. 金属加工, 2018, 6: 78-80.

[12] 张 强. 冷形变对 SCM435 冷镦钢球化退火组织性能的影响研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.

[13] 石正富, 袁月明, 宫 辉, 等. SCM435 冷镦钢的球化退火工艺[J]. 热处理, 2024, 39(5): 33-35.

[14] 南鹏飞, 王福明, 刘振民, 等. SCM435 冷镦钢的球化退火工艺[J]. 金属热处理, 2016, 41(11): 92-97.

[15] 田 伟, 王 兴, 支旭波, 等. SWRCH35 K 冷镦钢的球化退火工艺[J]. 金属热处理, 2023, 48(8): 190-194.

版 权 声 明

根据《中华人民共和国著作权法》，作者向《特殊钢》编辑部投稿(或接受约稿)，全体作者同意，上述提交本刊发表的作品一经本刊录用，作者即将作品整体以及附属于作品的图、表、摘要或其他可以从作品中提取部分的全部版权——包括但不限于复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权、改编权，在著作权保护期内转让给《特殊钢》编辑部。本刊所付一次性稿酬已包含上述各种稿酬，若编辑部再以其他形式在任何地点出版该论文，将不再支付作者稿酬。

作者应保证论文是作者独立创作的原创性作品，未曾发表；不涉及侵权和泄密问题；保证论文没有一稿多投；保证论文的署名权无争议，若发生问题，一切责任由作者承担，文责自负。

如有异议，请在投稿前说明，本刊即时处理。