

## 模具钢 4Cr5MoSiV1 超声探伤缺陷的分析和工艺改进

吕安明

(山东钢铁集团日照有限公司生产部,日照 276805)

**摘要** 山钢特钢事业部新区采用铁水 + 废钢 → 100 t 电弧炉 → 双工位 LF → 双工位 VD → 圆坯连铸(Φ500 mm 断面) → 步进式加热炉 → 950 轧机轧制的流程生产模具钢 4Cr5MoSiV1,个别批次的 4Cr5MoSiV1 模具钢存在探伤不合格缺陷,通过对该批次探伤不合格缺陷部位运用超声波进行定位,对所取试样进行金相和扫描电镜分析,最终确认了铸坯的心部缺陷及轧制压缩比小,是造成该批次 4Cr5MoSiV1 钢探伤不合格的主要原因,并提出了相应的改进措施。

**关键词** 4Cr5MoSiV1 探伤 分析 工艺改进

### Cause Analysis on Defect of Die Steel 4Cr5MoSiV1 by Ultrasonic Detection and Process Improvement

Lü Anming

(The Production Department, Shandong Iron and Steel Group Rizhao Co., Ltd., Rizhao 276805)

**Abstract** The die steel 4Cr5MoSiV1 was produced with the path of hot metal + scrap → 100 t EAF → double LF → double VD → round billet continuous casting (section Φ500 mm) → step reheating furnace → 950 rolling mill, in the special steel division new district of Shandong Steel. There are defects in the detection of individual batches die steel 4Cr5MoSiV1. By using the ultrasonic testing to locate the defect location, and analyzing with the way of Metallographic analysis and scanning electron microscopy (SEM), finally confirmed the center defect and the rolling compression ratio small are the main reasons of the testing substandard batch of steel 4Cr5MoSiV1, and the corresponding improved measures are put forward.

**Material Index** 4Cr5MoSiV1, Detection, Analysis, Process Improvement

4Cr5MoSiV1 钢是使用最广泛和最具代表性的热作模具钢种,可用于模锻锤锻模、铝合金压铸模、热挤压模具、高速精锻模具及锻造压力机模具等<sup>[1]</sup>,其具有高淬透性、淬硬性、强韧性和耐热疲劳等性能<sup>[2]</sup>。化学成分见表 1。

山钢 4Cr5MoSiV1 钢生产工艺流程为:铁水 + 废钢 → 100 t 电弧炉 → 双工位 LF → 双工位 VD → 圆坯连铸(Φ500 mm 断面) → 步进式加热炉 → 950 轧机轧制 → Φ120/Φ160 mm 圆钢 → 缓冷。出缓冷坑后对轧材进行了抽检探伤,探伤缺陷断续存在,当量为 Φ3 ~ Φ4 mm,Φ160 mm 规格个别超过 Φ6 mm。通过采取超声波探伤定位缺陷、取样、制样、低倍、高倍及扫描电镜等一系列手段,确定了缺陷产生的原因,并提出了工艺改进措施,解决 4Cr5MoSiV1 轧材探伤缺陷。

#### 1 取样检测分析

##### 1.1 缺陷探伤定位

对探伤不合格 4Cr5MoSiV1 钢进行超声波复探和缺陷准确定位。超声波探伤主要是利用超声波在不同介质中透射率、反射率的差异,并

通过其反映在探伤示波仪上的波形来判断钢板内部质量的一种无损检测方法。探伤反映出的主要缺陷有断续点条状及密集型超标缺陷,当量 Φ3 ~ Φ6 mm 不等,深度 50 ~ 70 mm。

##### 1.2 试样低倍观察

Φ160 mm 轧材探伤缺陷达到 Φ5 mm 部位锯切取低倍试样,并采用 1:1 的硝酸溶液浸湿 4 h,进行缺陷宏观形貌观察。1<sup>#</sup>与 2<sup>#</sup>试样横截面的低倍照片可见,缺陷位于材中心部位存在不连续、短条状的微裂纹,裂纹长度 1 ~ 2 mm,如图 1 所示。

##### 1.3 金相分析

将试样制成金相样后在光学显微镜下观察,1<sup>#</sup>试样金相组织正常,裂纹长度由 1 ~ 2 mm,裂纹没有脱碳,裂纹周围分布有小孔,直径从 22 ~ 95 μm;从 2<sup>#</sup>试样金相图看出周围组织正常,裂纹总长度约有

表 1 4Cr5MoSiV1 钢化学成分要求 / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Alt
0.32 ~ 0.45	0.80 ~ 1.20	0.20 ~ 0.60	≤ 0.015	≤ 0.010	4.75 ~ 5.50	≤ 0.25	1.10 ~ 1.75	≤ 0.25	0.80 ~ 1.20	≤ 0.030

注:协议要求(/%):(As + Sn + Pb + Sb + Bi) ≤ 0.025%, O ≤ 15 × 10<sup>-6</sup>, N ≤ 80 × 10<sup>-6</sup>, H ≤ 1.4 × 10<sup>-6</sup>

2 mm,周围存在细小孔洞。见图2。

### 1.4 扫描电镜分析

电镜扫描1#试样,图3,裂纹及孔洞处均为 Fe、C、Si、Mn、Cr、V 元素,无其他元素,见表2。

2#试样电镜扫描,图4,裂纹及孔洞处均为 Fe、C、Si、Mn、Cr、V 元素,存在微量 MnS 夹杂,见表3,试样缺陷为明显的疏松挤压痕迹且裂纹处有未压合的孔洞。

## 2 原因分析及改进措施

### 2.1 原因分析

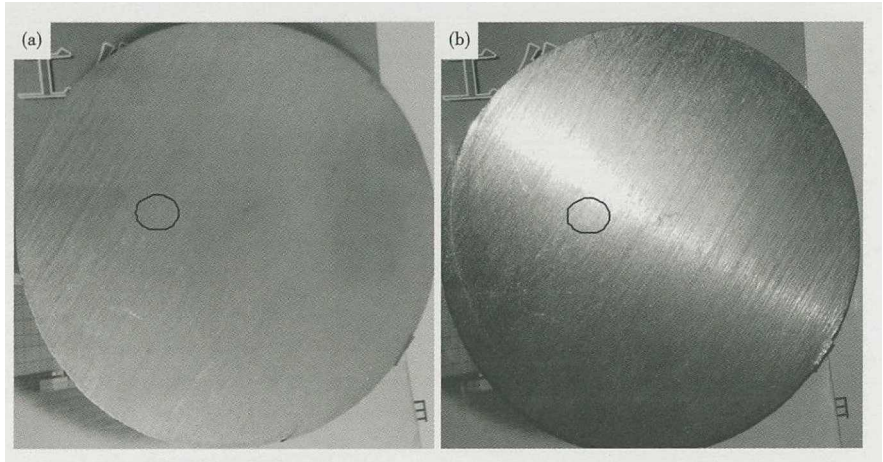


图1 Φ160 mm 棒材试样 1#(a)和 2#(b)低倍形貌

Fig.1 Morphology of microstructure of sample No. 1 (a) and No. 2 (b) of Φ160 mm bar products

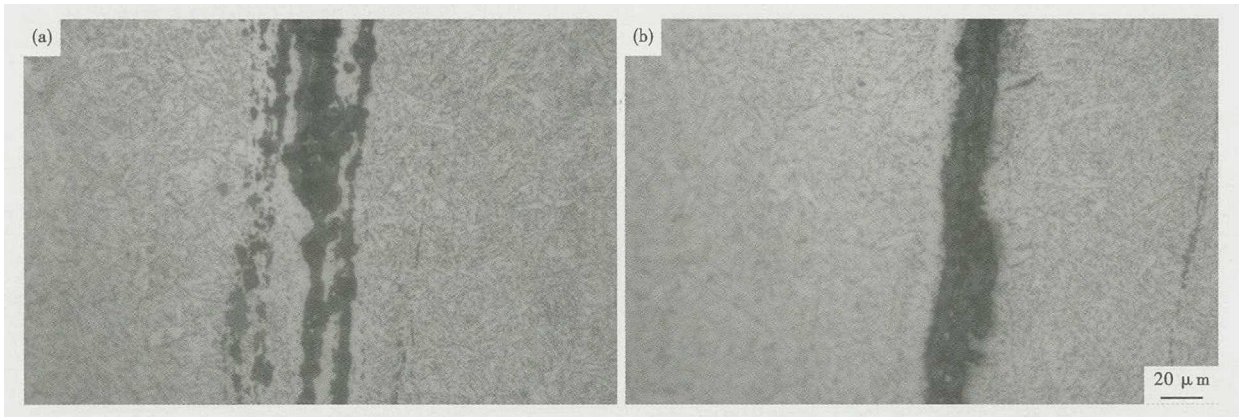


图2 1#(a)和 2#(b)试样裂纹形貌

Fig.2 Morphology of cracks of sample No. 1 (a) and No. 2 (b)

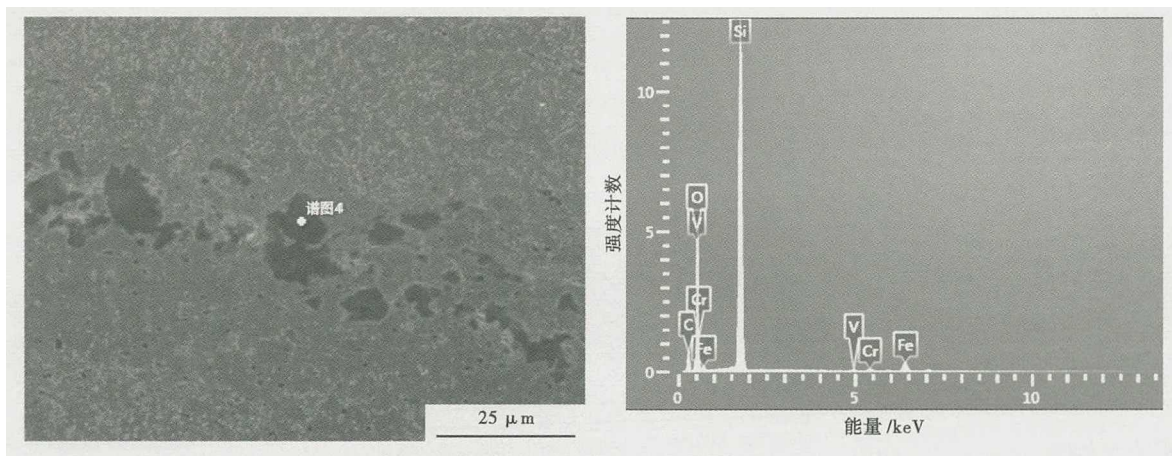


图3 1#试样缺陷形貌和 EDS 图谱 (SEM)

Fig.3 Morphology and EDS patterns of sample No. 1 defects, SEM

钢材中的的疏松、偏析、非金属夹杂物、气体等都可能引起超声波探伤不合格<sup>[3]</sup>。针对探伤不合格炉次,查找炼钢和连铸工序原始记录,未发现过程

异常情况,气体检验数据显示[O] $12.3 \times 10^{-6}$ , [N] $71 \times 10^{-6}$ , [H] $1.1 \times 10^{-6}$ ,说明铸坯气体含量正常,在标准范围内,可排除气体原因造成孔洞缺陷。

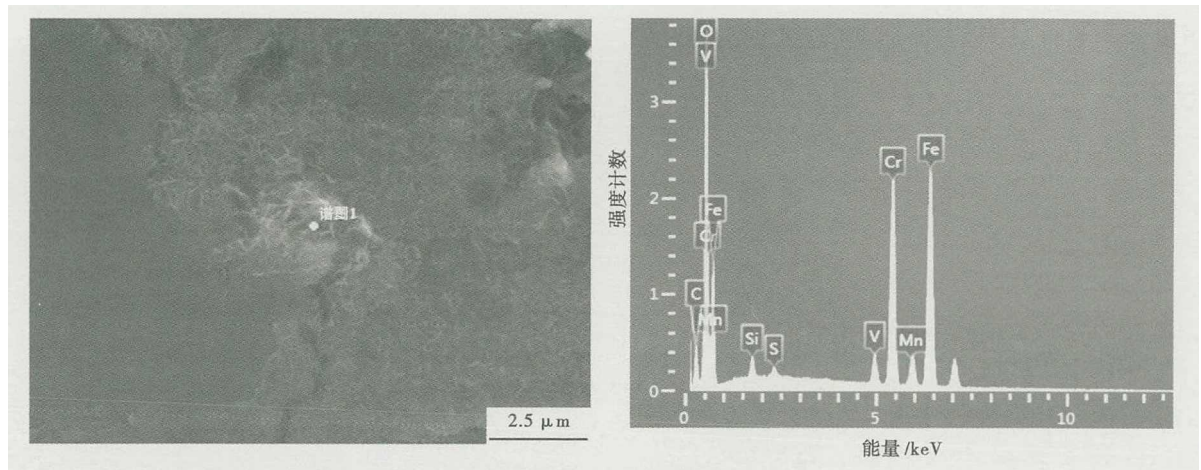


图 4 2#试样缺陷形貌和 EDS 图谱(SEM)  
Fig. 4 Morphology and EDS patterns of sample No. 2 defects, SEM

表 2 图 3 能谱分析元素/%

Table 2 Figure 3 energy spectrum analysis of elemental/%

C	O	Si	V	Cr	Fe
21.44	44.48	28.95	0.22	0.73	4.18

表 3 图 4 能谱分析元素/%

Table 2 Figure 4 energy spectrum analysis of elemental/%

C	O	Si	S	V	Cr	Mn	Fe
7.88	26.85	0.93	0.35	2.8	22.5	0.84	37.84

从本次试样探伤缺陷的金相及电镜扫描形貌来看,探伤缺陷产生的原因为轧材中心部位疏松孔洞未能焊合造成的缺陷,该缺陷产生的直接原因有两种,一是铸坯自身缺陷所致,二是轧制过程压缩不合理所致<sup>[4]</sup>。

2.1.1 铸坯自身缺陷

铸坯的断面上分布有细小的空隙为疏松,中心部位的疏松即为中心疏松<sup>[5]</sup>,它是由于柱状晶过度发达而引起,钢水在凝固过程中,由于二冷水冷却不均匀,柱状晶生长不规律,产生了“搭桥”。铸坯心部凝固缓慢的区域因微观补缩通道堵塞上面的钢水不能及时补充下面钢水的凝固收缩,严重的形成缩孔<sup>[5]</sup>并导致钢水中的成分不能均匀分布,桥下面钢水的凝固收缩力把周围枝晶间的富集 C、S、P 的液体吸入,形成中心偏析<sup>[5]</sup>。通常中心疏松、缩孔伴有明显的偏析,轧制后,不能完全焊合<sup>[6]</sup>。

观察与之轧制对应的 2 流、5

流连铸坯低倍,图 5,确实存在中心疏松与缩孔,见表 4。通过对该批次的 4Cr5MoSiV1 钢的生产过程情况进行跟踪调查发现:铸坯表面质量良好,浇注过程中,该炉次中间包钢水过热度偏高 8 ℃ 以上,且在该批次结束后的连铸设备检查中发现 2 流、5 流有喷嘴堵塞。浇注温度是影响柱状晶生长的重要因素,浇注温度越高,铸坯柱状晶越发达;二次冷却区域冷却不均匀,铸坯冷却质量差,造成铸坯在二次冷却区域产生回热较大,冷却强度降低,使柱状晶的形成不规则,生长较快的柱状晶连接在一起形成搭桥,若此时中心部位凝固而又无钢液补缩,则会产生疏松、偏析或微小缩孔<sup>[7]</sup>。

2#试样电镜观察到了 MnS 夹杂物,该炉次钢水中 S 与正常炉次比偏高达到了  $8.3 \times 10^{-5}$ , S、Mn 等易偏析元素会在凝固末期向钢中的疏松、偏析等薄弱部位聚集遗留在疏松孔内造成疏松孔,在锻造过程中不能焊合,在受到的外部较大的轧制力时,产生裂纹会导致探伤不合格<sup>[8]</sup>。

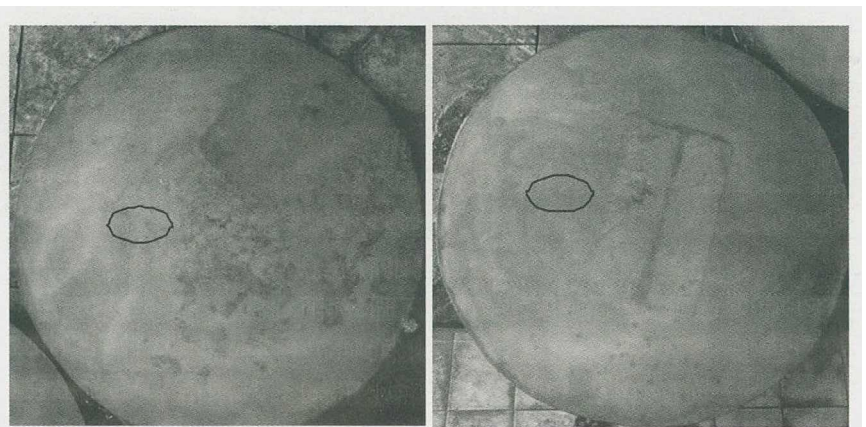


图 5 4Cr5MoSiV1 钢 Φ500 mm 圆坯低倍  
Fig. 5 Macrostructure of Φ500 mm round billet of steel 4Cr5MoSiV1

表4 4Cr5MoSiV1 钢 Φ500 mm 圆坯低倍检验结果/级  
Table 4 Φ500 mm round billet macroscopic test results of steel 4Cr5MoSiV1 /rating

炉号	中心疏松	缩孔	中心裂纹	中间裂纹	皮下气泡、皮下裂纹
02304-2	1.0	0.5	0	0	0
02304-5	1.0	0	0	0	0

2.1.2 轧制过程压缩比小

按照 Φ3 mm 灵敏度对 Φ120/Φ160 mm 规格分别进行超声波探伤,Φ160 mm 规格轧材有单个缺陷,也有密集型缺陷。在整支有断续分布。缺陷当量为 Φ3 ~ Φ6 mm,大部分在 Φ4 mm 水平,个别达到 Φ6 mm。Φ120 mm 规格轧材无缺陷,内部质量良好。

对比 Φ120 mm、Φ160 mm 探伤情况及金相检验分析,Φ500 mm 铸坯轧制 Φ120 mm 规格压缩比 17.36,而轧制 Φ160 mm 规格压缩比仅为 9.76,轧制过程压缩比不合理导致轧材探伤不合格的另一原因<sup>[9]</sup>。

2.2 改进措施

(1)控制钢水成分[S] ≤ 3 × 10<sup>-5</sup>, [P] ≤ 7 × 10<sup>-5</sup>,从而提高[Mn]/[S]比,从而减少晶界处 MnS 夹杂物形成,同时减少铸坯心部 P S 易偏析元素的含量。

(2)稳定连铸“三恒”操作,液面波动控制在 2 mm 之内,Φ500 mm 断面圆坯拉速稳定在 0.35 m/min,过热度控制在 15 ~ 25 °C,生产前对二冷段所有喷嘴进行检查,确保喷嘴通畅、二冷水冷却均匀。

(3)合理选择轧制压缩比,Φ160 mm 规格 4Cr5MoSiV1 轧材采用 Φ650/Φ700 mm 大规格铸坯圆坯进行轧制。

3 结论

(1)钢水浇注温度过高和铸坯的二冷段冷却不均匀所导致的铸坯心部缩孔、疏松、偏析,是造成 4Cr5MoSiV1 轧材探伤不合格的主要原因。

(2)通过严格控制钢水的浇注温度,开浇前对喷嘴检查确认及合理选择轧制压缩比等措施,可有效提高 4Cr5MoSiV1 轧材探伤合格率。

(3)Φ160 mm 规格 4Cr5MoSiV1 轧材采用 Φ650 mm 断面连铸圆坯轧制,Φ3 mm 灵敏度探伤检测无缺陷,内部质量良好。

参考文献

[1] 李彩明. H13 模具钢应用与发展[J]. 中国材料科技与设备, 2009(4):3-4.

[2] 吴 鹏,杨毓永,杜飞虎. 提高 H13 大棒材探伤合格率工艺实践[J]. 特钢技术,2016,22(3):45-47.

[3] 张海军. 钢板探伤不合格原因分析[J]. 宽厚板,2002,8(1):12-16.

[4] 李 婧,邵长静,刘相华,等. Q345 高强度宽厚钢板探伤缺陷原因及分析[J]. 材料热处理学报,2015,36(5):117-122.

[5] 姜锡山. 连铸钢缺陷分析与对策[M]. 北京:机械工业出版社, 2011:129-141.

[6] 黄 军,何广霞,吴 扬,等. 塑料模具钢厚板探伤不合格原因分析及改进措施[J]. 特钢技术,2017,23(1):24-26.

[7] 李连任,刘德红,毕于顺,等. 厚规格压力容器板探伤不合格原因分析及改进措施[J]. 天津冶金,2011,30(2):46-48.

[8] 张志宏,刘军利,刘伟平. 大圆坯中心偏析成因解析及质量控制[J]. 钢铁,2013,29(2):19-21.

[9] 贾希光. 30CrMo 合金钢板探伤不合格原因探讨及改进措施[J]. 宽厚板,2016,22(3):25-28.

吕安明(1986-),男,工程师,2009年内蒙古科技大学(本科)毕业,炼钢、连铸工艺技术管理。  
E-mail:lam19860101@126.com

收稿日期:2018-03-09

欢迎订阅 2019 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社