

# 钢板内部缺陷失效分析

谢国君 王影 袁建宇 逢锦程 韩露

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

**文 摘** 采用 120 mm 厚的 45# 钢轧制板材经粗加工后进行调质处理, 热处理后超声探伤发现钢板厚度方向中部存在缺陷。通过失效分析认为, 钢板内部的缺陷为沿变形方向分布的带状组织, 部分带状组织中存在着沿晶裂纹。形成带状组织及裂纹的机理是原材料钢锭浇铸过程中心部形成枝晶偏析, 轧制过程中偏析区被拉长因而形成偏析条带, 条带区因富含 Mn、S、P 等元素形成硬度较高的马氏体组织, 调质热处理过程中在组织应力及热应力作用下马氏体条带组织区域发生沿晶脆性开裂。

**关键词** 钢板, 缺陷, 带状组织, 沿晶裂纹, 成分偏析

中图分类号: TB31

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2019.03.015

## Failure Analysis of Defects in Steel Plate

XIE Guojun WANG Ying YUAN Jianyu PANG Jincheng HAN Lu

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** The 45 steel rolled plate with 120 mm thickness was roughly-treated and tempered. After heat treatment, the defects in the middle part of the thickness direction of the steel plate were found by ultrasonic inspection. The results of failure analysis show that the defects in the steel plate are banded structure and distributed along the deformation direction, and some of the banded structures have intergranular cracks. The mechanism of appearance of banded structure and crack is as follows: the central part of the ingot casting process appear dendritic segregation, and the segregation zone is lengthened during the rolling process to form the segregation zone. Because of the high hardness of martensite structure forms in the strip zone, the microstructure of martensite strip is cracked along the intergranular brittleness under the action of microstructural stress and thermal stress during the tempering treatment.

**Key words** Steel plate, Defects, Banded structure, Intergranular cracks, Component segregation

### 0 引言

带状组织是钢材内部的一种缺陷, 可分为一次和二次带状组织。在冶炼过程中, 由于钢水凝固时产生枝晶偏析所形成的原始带状组织称为一次带状组织; 钢材在热加工后冷却所产生的沿轧制方向平行排列、呈层状分布、形同条带的组织称为二次带状组织, 即常讲的带状组织。带状组织的存在使钢的组织不均匀, 并严重影响其性能, 降低塑性、冲击韧性、断裂韧性和断面收缩率, 造成冷弯不合格、冲压废品率高; 热处理时钢材容易变形、淬火开裂<sup>[1-2]</sup>。本文对一种内部存在缺陷的 45# 钢板进行失效分析, 对缺陷的性质及成因进行判定, 并分析带状组织的形成机理。

### 1 实验

#### 1.1 材料与设备

研究对象为 120 mm 厚的 45# 钢板, 经轧制成型,

钢板在调质热处理后经超声探伤发现厚度方向中部存在缺陷, 但不能确定缺陷的类型。主要设备为 KEYENCE VHX-1000 视频光学显微镜, FEI Quanta 650 FEG 场发射扫描电镜, Leica DM4000M 金相显微镜及 Buehler 显微镜硬度计。

#### 1.2 形貌观察与成分分析

采用机械方法从尺寸较大的缺陷部位取样并将其打开, 采用视频光学显微镜对缺陷断面进行观察, 缺陷表面凹凸不平且粗糙, 有金属光泽、未见腐蚀及氧化痕迹, 部分区域呈颗粒状, 宏观形貌见图 1。采用扫描电镜及能谱仪对缺陷表面进行形貌观察及能谱分析: 缺陷表面微观呈沿晶+解理形貌, 二者比例相近, 部分晶面上可见一些弥散分布的颗粒状物质, 分析结果表明其为硫化物夹杂或磷化物夹杂, 断面正常区域主成分与 45# 钢相符, 缺陷表面微观形貌及能谱分析见图 2。

收稿日期: 2018-12-01

第一作者简介: 谢国君, 1978 年出生, 硕士, 高级工程师, 主要从事机械产品失效分析工作。E-mail: xieyuanliu617@163.com

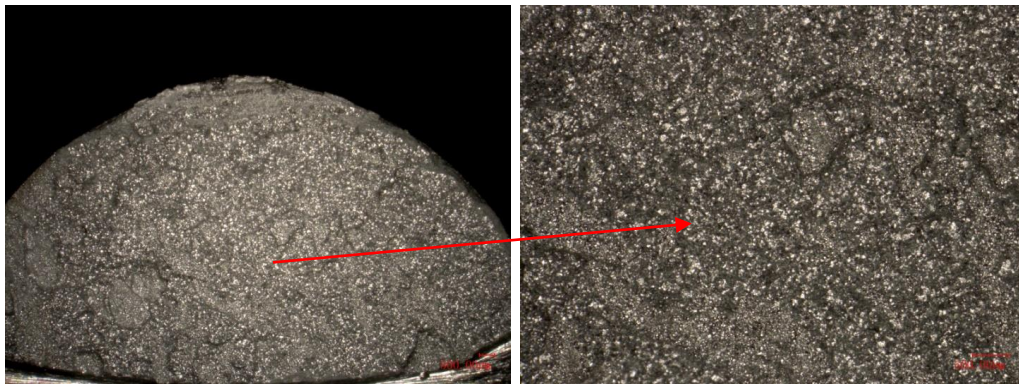
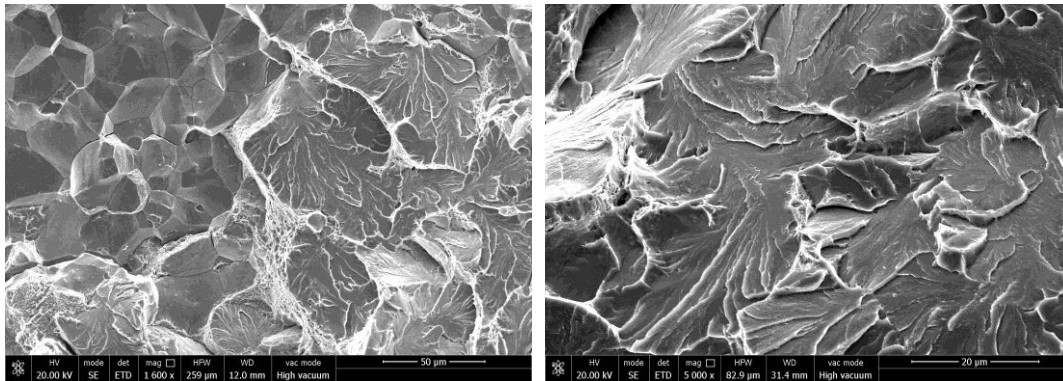


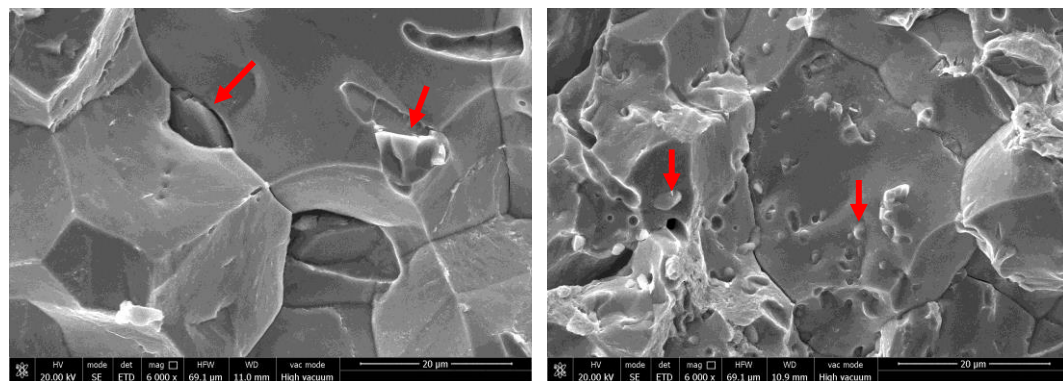
图1 缺陷表面宏观形貌

Fig. 1 Macro morphology of defects



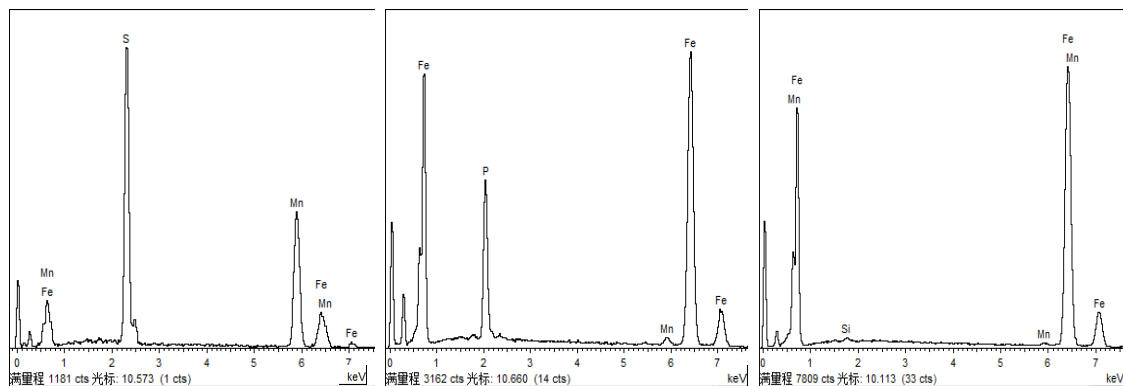
(a) 沿晶及解理形貌

(b) 解理形貌



(c) 沿晶晶面上的硫化物形貌

(d) 沿晶晶面上的磷化物形貌



(e) 硫化物能谱图

(f) 磷化物能谱图

(g) 正常断面能谱图

图2 缺陷表面微观形貌及能谱分析

Fig. 2 Micro morphology and EDS of defects



### 1.3 金相分析及显微硬度测试

从缺陷部位截取部分试样进行金相分析及显微硬度测试,结果如下。

(1)试样由表面向心部硫化物夹杂数量逐渐增多,形貌见图3。根据GB/T 10561—2005进行评定,表面区域硫化物夹杂级别<0.5级,心部区域最大级别为2.0级。

(2)试样剖面绝大部分区域显微组织为回火索氏体+铁素体,其中铁素体趋于网状分布;心部区域可见较多沿轧制方向断续分布的条带状白亮组织,放大为马氏体组织,条带中部可见一些沿轧制方向分布的硫化物夹杂;部分白亮组织中存在沿轧制方

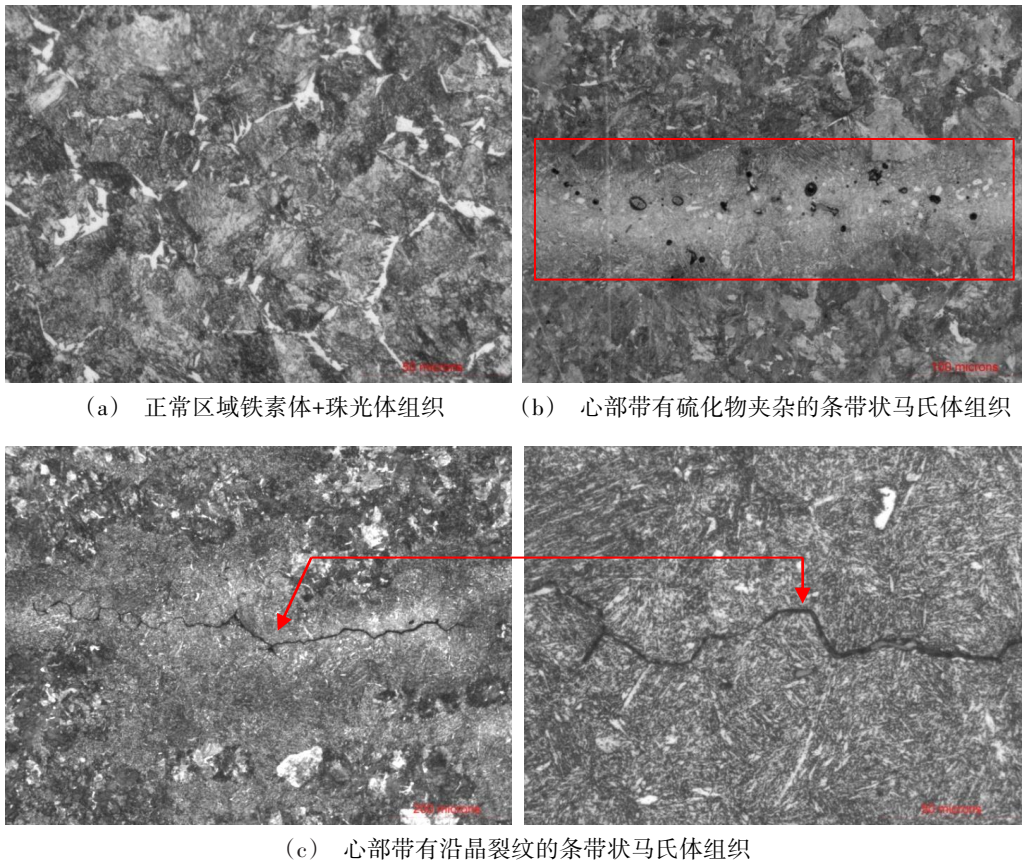
向的沿晶裂纹,见图4。



(a) 靠近表面区域硫化物 (b) 心部区域硫化物  
图3 非金属夹杂物形貌

Fig. 3 Morphology of nonmetallic inclusions

(3)对金相试样进行显微硬度测试,正常区域组织硬度均值为HV288,白亮组织区域硬度均值为HV452,远高于正常区域。



(a) 正常区域铁素体+珠光体组织 (b) 心部带有硫化物夹杂的条带状马氏体组织

(c) 心部带有沿晶裂纹的条带状马氏体组织

图4 显微组织形貌

Fig. 4 Microstructure of defects

### 1.4 化学成分分析

对钢板材料进行化学成分分析,结果见表1,材

料成分与45#钢牌号相符。

表1 化学成分分析结果<sup>1)</sup>

Tab. 1 Results of chemical composition analysis							% (质量分数)
C	S	P	Cr	Ni	Mn	Si	Cu
0.47	0.0040	0.017	0.069	0.044	0.69	0.24	0.0091
0.42~0.50	≤0.035	≤0.035	≤0.25	≤0.30	0.50~0.80	0.17~0.37	≤0.25

注:1)第一行为测试值;第二行为标准参考值。

### 2 分析与讨论

钢板在调质热处理后探伤发现内部多处区域存

在缺陷,解剖结果表明缺陷均位于板厚的中部位置,打开的缺陷表面未见腐蚀及氧化痕迹,微观呈沿晶+

解理形貌,部分晶面上存在一些硫化物或磷化物夹杂颗粒,能谱分析结果表明沿晶断面上的Mn及P、S元素含量明显超标;金相分析结果表明钢板大部分区域显微组织为回火索氏体+铁素体,但心部区域(板厚中部位置)存在较多条带状白亮马氏体组织,组织中存在较多硫化物夹杂,该组织硬度远高于正常组织,部分白亮组织中存在沿晶裂纹。根据以上观察结果综合分析认为,探伤显示的缺陷应为聚集分布的沿晶裂纹,缺陷表面的解理形貌应是在打开缺陷过程中形成的人工断口形貌。

根据断面能谱分析结果及金相分析结果判断,钢板厚度方向中部的条带状白亮马氏体组织中应存在合金元素(主要是Mn)及杂质元素(S、P)的偏析,成因应是钢锭浇铸过程中心部形成枝晶偏析,轧制过程中偏析区被拉长因而形成偏析条带,该区域由于富集Mn、P、S(可能还有C)等元素而增加了淬透性,因而在热处理过程中形成了与正常区域不同的马氏体组织<sup>[3-10]</sup>,在组织应力及热应力作用下高硬度组织易于发生脆性开裂。

上述偏析属于宏观偏析,也可称之为位置偏析,一般在铸锭最后形成部位出现,正常情况下该缺陷在变形加工前应予以去除,若未去除完全则会遗留至最终产品,并可能造成材料性能下降甚至开裂。

### 3 结论

通过对钢板的失效分析认为,钢板厚度方向中部位置的缺陷为沿变形方向分布的带状组织,部分带状组织中存在沿晶裂纹。形成带状组织及裂纹的

机理是:原材料钢锭浇铸过程中心部形成枝晶偏析,轧制过程中偏析区被拉长因而形成偏析条带,条带区因富含Mn、S、P等元素形成硬度较高的马氏体组织,调质热处理过程中在组织应力及热应力作用下马氏体条带组织区域发生沿晶脆性开裂。

### 参考文献

- [1] 纪元,等. 钢中带状组织及其研究现状[J]. 中国冶金,2016,26(4):1-9.
- [2] 张迎晖,赖泓州,赵鸿金. 钢中带状组织的研究现状[J]. 轧钢,2014,31(3):45-47.
- [3] 范志永,等. Q345E中厚板探伤不合内部缺陷分析与控制[J]. 冶金标准与质量,2010,48(5):16-18.
- [4] 周民,等. X100钢线管中的异常偏析带分析[J]. 东北大学学报,2010,31(3):385-388.
- [5] 刘富军,刘年富,廖卫团. 带状组织对低碳微合金钢性能的影响及控制[J]. 南方金属,2011(178):7-10.
- [6] 崔怀周,陈伟庆,曹长法. 帘线钢盘条带状组织的分析[J]. 金属热处理,2011,36(6):41-45.
- [7] 张延玲,等. 低碳齿轮钢中合金元素的偏析行为及其对带状组织的影响[J]. 北京科技大学学报,2009,31(Suppl. 1):199-206.
- [8] 孙祥华,等. 两相区冷速对齿轮钢20CrMnTi带状组织的影响[J]. 材料热处理学报,2012,33(4):91-95.
- [9] 杨兴文,等. 曲轴用非调质钢C38N2带状组织消除工艺的研究[J]. 热加工工艺,2017,46(6):226-229.
- [10] 张秀芝,杨仁杰,刘建生. 热处理温度与冷却速度对热扩成形Q345E钢风电法兰中带状组织的影响[J]. 塑性工程学报,2016,23(6):24-29.