

# Q690D 钢焊后分层开裂机理研究

于礼军<sup>1,2</sup>, 姬庆涛<sup>1,2\*</sup>, 吴成峰<sup>1,2</sup>, 张学东<sup>1,2</sup>, 杜传坤<sup>1,2</sup>, 时玉亭<sup>1,2</sup>

(1. 山东兖矿智能制造有限公司, 山东 济宁 273500;

2. 兖矿东华重工有限公司, 山东 济宁 273500)

**摘要:** 目的 研究液压支架部件(底座)焊接后, Q690D 钢板母材厚度约 1/2 处出现分层开裂的根本原因, 确认是原材料自身的缺陷还是生产过程中工艺方法存在的缺陷, 研究焊接后 Q690D 钢板母材  $T/2$  ( $T$  为板材厚度) 处开裂的机理, 找到产生此类缺陷的根源。方法 在疑似开裂处取样(冷加工铣削, 不影响已有缺陷), 对试样进行编号, 制作各类检测样品, 分析不同试样不同位置的金相组织、硬度数值、化学成分、断口形貌、断口处化学成分, 确认是否为分层开裂缺陷, 并进一步多角度对比各项检测数据, 确定缺陷类型及缺陷形成的根本原因。结果 综合判断检测数值, 确定原材料在轧制过程中存在一定程度的内部成分偏析为母材开裂的根本原因, 火焰热切割及焊接后的热应力为潜在的微裂纹尖端萌生提供了外部条件, 促使偏析带的脆硬层发生局部的开裂并进一步扩展形成裂纹。结论 原钢板母材中存在一定程度的 A 类、B 类、D 类夹杂物, 聚集在  $T/2$  处形成“脆性夹层”, 在热切割及焊接热输入(产生的内应力)作用下萌生裂纹并扩展开裂。

**关键词:** 液压支架; Q690D; 焊接; 偏析; 分层开裂; 金相; 能谱分析

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2025.02.012

**中图分类号:** TG444.7; TD355 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-6457(2025)02-0102-09

## Delaminating Cracks of Q690D Steel after Welding

YU Lijun<sup>1,2</sup>, JI Qingtao<sup>1,2\*</sup>, WU Chengfeng<sup>1,2</sup>, ZHANG Xuedong<sup>1,2</sup>, DU Chuankun<sup>1,2</sup>, SHI Yuting<sup>1,2</sup>

(1. Shandong Yankuang Intelligent Manufacturing Co., Ltd., Shandong Jining 273500, China;

2. Yankuang Donghua Heavy Industry Co., Ltd., Shandong Jining 273500, China)

**ABSTRACT:** The work aims to analyze the cause of delaminating cracks at the 1/2 thickness of Q690D steel plate after the welding of the hydraulic roof support component (base), determine whether the defects come from the raw material or the production processing method, research on the mechanism of cracking at  $T/2$  ( $T$ =thickness) of the Q690D steel plate after welding, and find the root cause of such defects. Through the suspected cracking sampling (cold processing milling, non-affect the existing defects), the samples were numbered and made into all kinds of test samples to analyze metallographic structure, hardness, chemical composition, fracture morphology and chemical composition of the different samples on different locations, to confirm the delaminating defects, and further compare the data, and determine the type of defects and the root cause of defects. From the detection data comprehensive judgment, it was determined that the raw materials in the rolling process existed some internal

收稿日期: 2024-09-02

Received: 2024-09-02

基金项目: 山东省重点研发计划重大科技创新工程(2019SDZY0401)

Fund: Shandong Province Key Research and Development Plan of Major Science and Technology Innovation Project (2019SDZY0401)

引文格式: 于礼军, 姬庆涛, 吴成峰, 等. Q690D 钢焊后分层开裂机理研究[J]. 精密成形工程, 2025, 17(2): 102-110.

YU Lijun, JI Qingtao, WU Chengfeng, et al. Delaminating Cracks of Q690D Steel after Welding[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2025, 17(2): 102-110.

\*通信作者( Corresponding author )

composition segregation as the root cause of the delaminating cracks, the internal thermal stress after the flame thermal cutting and welding was the potential micro crack tip initiation which provided external conditions, prompting the brittle hard zone of local cracking and further extended cracks. There are some class A, class B and class D inclusion in the raw steel plate material, which gather at  $T/2$  to form a “brittle sandwich”, and crack expanding under the action of thermal input (internal thermal stress) after flame thermal cutting and welding.

**KEY WORDS:** hydraulic roof support; Q690D; welding; segregation; delaminating cracks; metallographic phase; energy dispersive spectrometer analysis

液压支架是井工煤炭开采工作面重要的综采综放设备之一, 在采煤过程中, 破碎面断裂后, 顶板压力以外力的形式作用在液压支架上; 液压支架用来控制采煤工作面的矿山压力, 以及在煤矿开采过程中控制采煤工作面顶板高度、支撑矿顶, 形成一个可移动的井工采煤作业空间, 以便配套的开采设备(转载机、刮板输送机及采煤机等)在该可移动空间内安全作业。1958 年我国第一台液压支架诞生, 1970 年我国第一套全工作面综采设备开始工业性试验, 2004 年我国开始使用国产液压支架全面替代进口产品<sup>[1-4]</sup>。目前我国以煤炭为主体的能源结构未发生重大改变, 随着国际形势变化、城市化和工业化进程的加快以及国民经济的快速发展, 能源消耗进一步加大, 对煤炭的需求量持续走高, 这进一步推动了煤矿机械制造业的高速发展, 液压支架产品在井工煤炭开采机械化、自动化、智能化的道路上发挥了重要的支撑作用<sup>[5-6]</sup>。随着国家高质量发展战略需求的推进, 在中国智造大背景下, 液压支架制造过程全面开启了技术升级的革新之路, 比如, 主体结构件(顶梁、掩梁、底座、连杆)的自动化、智能化拼装焊接<sup>[7-9]</sup>, 以及立柱千斤顶制造智能化、装配自动化升级是近几年的主流研究方向<sup>[10-12]</sup>; 从原材料下料(锯切、车削)到加工过程, 各道工序均有完善的质量追溯管控流程, 全面保障液压支架产品的高质量发展, 进一步确保煤炭开采工作面的长时间稳定可靠运行。

在机器人焊后(富氩气体保护焊)探伤时发现某订单产品的某底座内主筋板(见图 1)外露面在板厚约  $T/2$  ( $T$  为板材厚度)处存在断续、非阶梯状近似直线分布的疑似裂纹缺陷。为确保后续产品的质量可靠, 决定对疑似缺陷处进行取样(取样示意图如图 1 红线处所示, 龙门加工中心冷加工铣削取样), 对开裂处进行金相分析、硬度检测、化学成分检测、断口形貌分析, 找到产生此疑似缺陷的根本原因, 以制定相应预防措施从而有效管控制品的产品质量。

## 1 情况描述

疑似开裂处为底座内主筋板(原材料材质为 Q690D, 厚度为 40 mm, 母材一般为索氏体组织)。

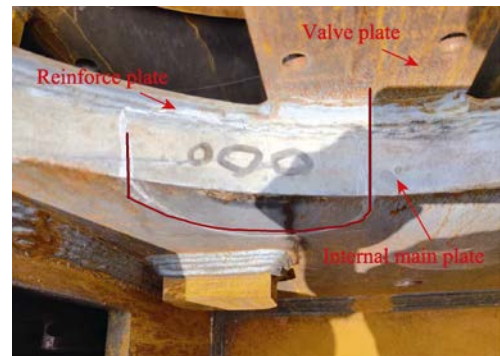


图 1 底座内主筋板开裂处及取样位置示例  
Fig.1 Example of layered cracking place and sampling location of base parts

生产工艺过程如下: 将热切割后的内主筋板与贴板(等离子下料后切坡口)焊接后成为组件, 内主筋板与补强贴板之间采用坡口焊缝连接(两零件间隙控制在 0.5 mm 以内), 再将阀板与前述组件焊接, 焊接后未进行退火时效处理<sup>[13]</sup>。探伤时发现此处疑似开裂问题并及时进行隔离。

疑似开裂试样送检时的外观如图 2 所示。为避免取样过程对疑似裂纹产生影响, 取样前对火焰热切割面进行胶封(灰黑色密封胶, 表面有颗粒状, 具体见图 2)处理; 检验前对试样表面的密封胶进行清洁处理, 利用钢丝刷对主筋“疑似裂纹”面进行清理后, 通过渗透探伤及目视检测, 在内主筋板  $T/2$  处观察到了 3 处直线型缺陷且呈断续分布, 具有裂纹的外观形态; 如图 3 红色线条处所示为 3 处缺陷所在位置, 位于  $T/2$  处的同一直线方向上。

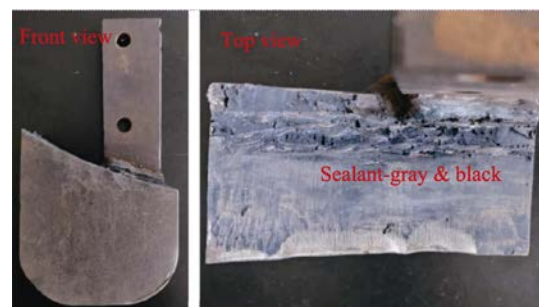


图 2 开裂取样后外观示例  
Fig.2 Example of cracked piece in appearance

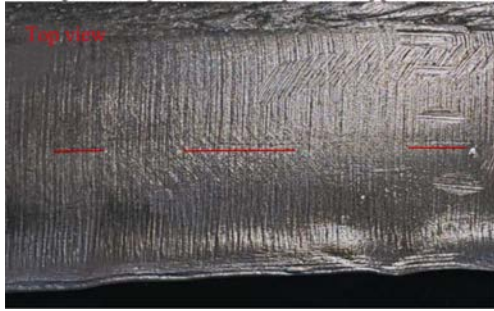


图3 试件切割面裂纹(红线上侧,长度接近)位置示例  
Fig.3 Example of crack (above the red lines, similar length) position of specimen cutting panel

## 2 试样金相

对3处缺陷进行编号,自左向右依次为1、2、3,如图4所示;使用电火花线切割法取垂直于编号1居中处的试样,用于对裂纹截面进行宏观、微观金相检测(试样包括全板厚结构断面,并保留原火焰切割面);取编号2全长裂纹形态处的试样,对其进行正面弯曲试验<sup>[14]</sup>,以制备沿裂纹长度方向的断口试样,用于断口形貌、断口成分分析;编号3处试样暂保留不做检验(备用)。

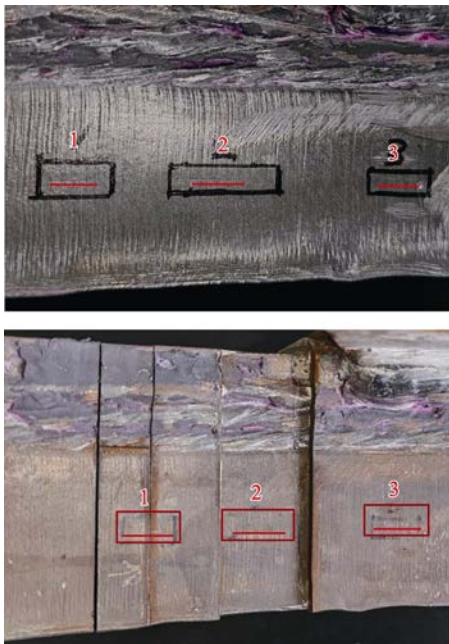


图4 裂纹处编号(红线上侧,长度接近)  
(a)以及金相、断口试样取样位置(b)  
Fig.4 Cracking location number (a) and sampling location of metallographic and fracture samples (b)

编号1处光学显微镜下的宏观金相形貌如图5所示。可以看到图示上表面层因火焰热切割的热作用发生了组织变化,此上表层为热切割后正常的淬硬层(火焰热切割会导致组织变化,表面的淬硬层是切割

过程中的高温火焰加热工件表面,热量使原材料表层组织迅速升温至临界温度以上,之后迅速冷却,从而在工件表面形成一层硬度较高的淬硬层,即马氏体组织,淬硬层的深度受工件材料、加热温度、加热时间、冷却方式等因素影响,一般为0.5~3 mm)。图5左上拐角处为火焰切割切入点,沿着热切割面走向分布,可见,受热时间长导致淬硬层厚度明显偏大,在热切割影响较大的表层区域,淬硬层厚度约为1.2 mm(图5上侧暗灰色区域)。在试样中心(对应内主筋板厚度的 $T/2$ 处)存在连续分布的成分偏析带,属原材料(钢板)中原始成分偏析<sup>[15]</sup>,火焰切割淬硬层与 $T/2$ 偏析带交会形成“T”字型区域,在其交叉位置萌生裂纹,裂纹沿 $T/2$ 偏析带深度方向由切割面向内部扩展,可观察到编号1试样上的裂纹深度约为4.0 mm。

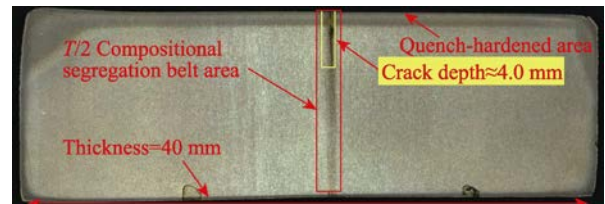


图5 裂纹截面的宏观组织形貌(金相显微镜)  
Fig.5 Macroscopic tissue morphology of crack section (OM)

为进一步研究其开裂机理,在内主筋板裂纹截面上分别对 $T/2$ 和 $T/4$ 处(平行于裂纹方向)的金相组织进行对比,不同区域的微观金相组织如表1所示,具体组织形貌如图6所示。在火焰切割过程中,表层的碳与氧及水蒸气等发生反应,降低了表层碳浓度(脱碳),脱碳后表面硬度、疲劳强度及耐磨性降低,表面易形成残余拉应力从而加剧裂纹萌生。在火焰切割的热作用下,原始板材 $T/2$ 偏析带位置一定深度范围内(约1.2 mm)的金相组织产生了淬硬层,即在切割热影响区内形成了在板厚方向上的组织“硬化夹层”。通过对比可明显看到 $T/2$ 处有更多的马氏体组织<sup>[16]</sup>,在板材的表层、过热区、正火区均有零星分布,此处组织的局部层状突变是裂纹萌生的重要原因。

通过分析 $T/2$ 裂纹区、 $T/2$ 未开裂区域和 $T/4$ 位置区的夹杂物分布情况(见图7),发现 $T/2$ 裂纹区存在较多非金属A类夹杂物(硫化物类,具有高延展性,有较宽范围形态比的单个灰色夹杂物,一般端部呈圆角),主要为含Ti夹杂物<sup>[17-18]</sup>、硫化物<sup>[19]</sup>,且二者存在一定形式的复合/混合情况,分布方向与裂纹基本平行(与钢板轧制方向一致); $T/2$ 未开裂区域的夹杂物情况与裂纹区的基本一致<sup>[20]</sup>;  $T/4$ 位置的夹杂物为D类夹杂物(球状氧化物,不变形,带角或圆形、形态比小、黑色或带蓝色、无规则分布的颗粒)和B类夹杂物(氧化铝类,大多数没有变形,带角的、形态比小、黑色或带蓝色的颗粒,沿轧制方向排成一行),且并未发现其余类型的夹杂物<sup>[21]</sup>。非金属夹杂

表 1 1# 试样 T/2 和 T/4 处的金相组织对比  
 Tab.1 Comparison of metallographic organization at T/2 and T/4 of 1# sample

Location		T/2 zone	T/4 zone
Flame cutting heat affected zone	Surface area	M	B+M(a few)
	Overheating area	M	B+M(a few)
	Normalizing area	M	B+M(a few)
	Imperfect normalizing area	T.S.+F+M	T.S.+F+B+M
Away off flame cutting surface		T.S.	T.S.

Note: M is martensite, B is bainite, T.S. is tempered Sorbite, F is ferrite.

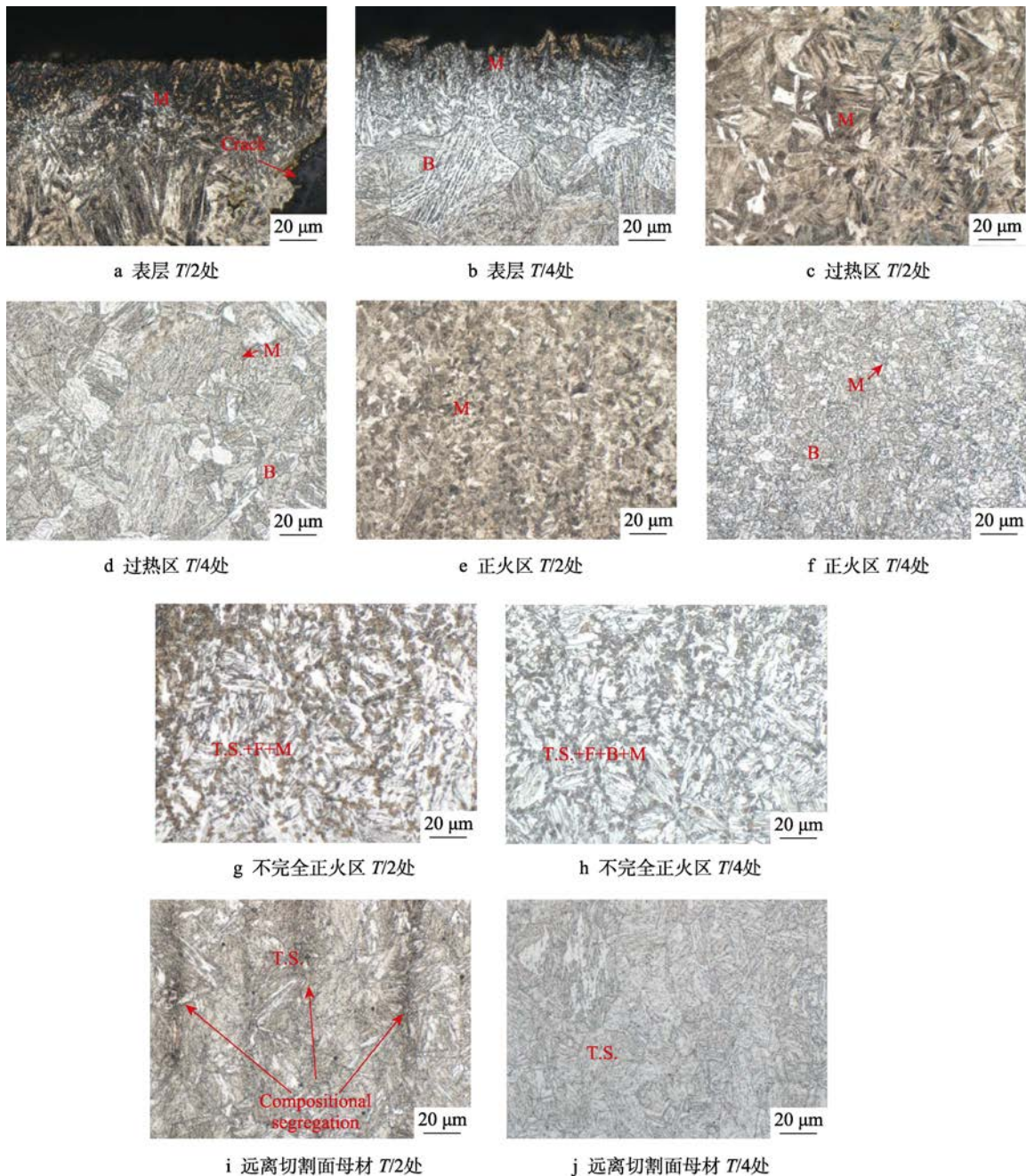


图 6 编号 1 试样截面不同位置的微观组织形貌 (金相显微镜)

Fig.6 Different positions of microstructure morphology on 1# sample (OM): a) surface area T/2; b) surface area T/4; c) overheating area T/2; d) overheating area T/4; e) normalizing area T/2; f) normalizing area T/4; g) imperfect normalizing area T/2; h) imperfect normalizing area T/4; i) away off flame cutting surface T/2; j) away off flame cutting surface T/4

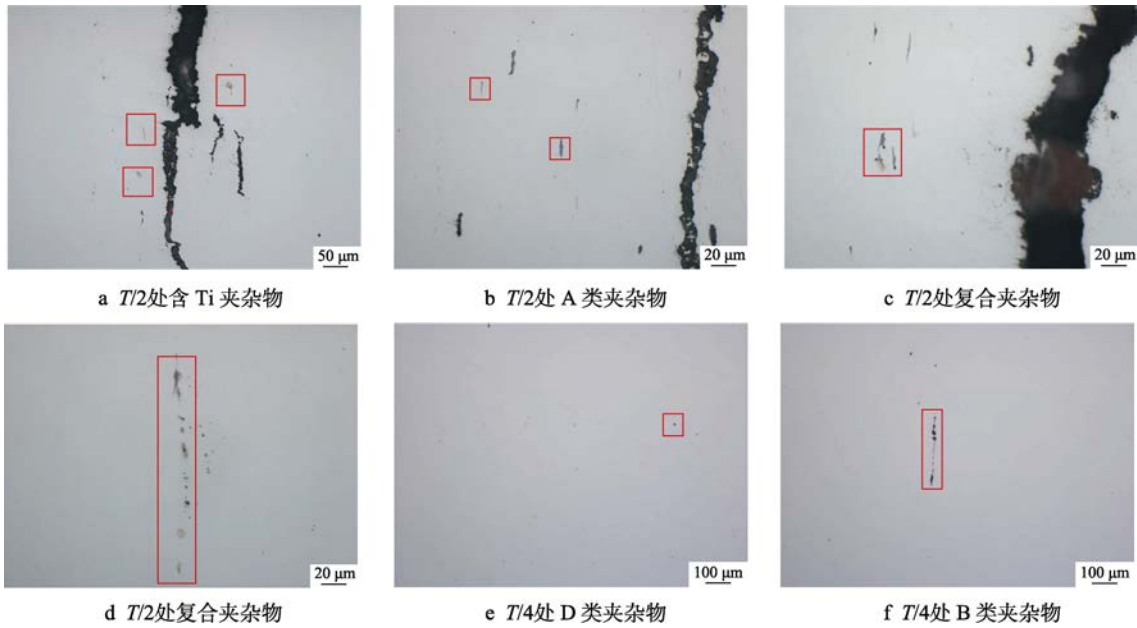


图7 裂纹截面非金属的夹杂物分布

Fig.7 Distribution of non-metallic inclusions in crack section: a) Ti inclusions at  $T/2$ ; b) A type inclusions at  $T/2$ ; c) composite inclusions at  $T/2$  sample; d) composite inclusions at  $T/2$ ; e) D type inclusions at  $T/4$  sample; f) B type inclusions at  $T/4$  sample

物集中分布于  $T/2$  处,分析可得,原始钢板原材料  $T/2$  板厚处存在一定程度的夹杂物富集;夹杂物一般分为内生夹杂物和外来夹杂物,夹杂物溶解在钢液中,在降温凝固时,由于溶解度的降低,夹杂物与其他元素结合,以化合物的形式从液相或固溶体中析出,留在钢锭中并最终在钢板原材料中呈现出来,一般情况下夹杂物分布比较均匀,颗粒也较小,正确的熔炼和合理的轧制工艺可以控制其数量并改变其成分、大小和分布情况,夹杂物无法完全避免。

### 3 硬度

对编号 1 处的金相试样进行显微维氏硬度测试 (HV1),测试位置分别为近火焰切割表面区和近裂纹末端尖端区,以  $T/2$  处为中心向两侧每间隔 0.5 mm 测试一次,至测试结果稳定;测试结果如图 8 所示。

近火焰切割表面区的硬度极高值出现在  $T/2$  偏析带裂纹的边缘区域,维氏硬度极高值为 439HV1,偏析带以外的两侧硬度平均值约为 350HV1,即偏析带淬硬显著;裂纹末端尖端区(未受切割热影响)的硬度极高值同样出现在  $T/2$  偏析带中,为 302HV1,偏析带以外的两侧硬度平均值约 255HV1,据此可推断原板材中  $T/2$  偏析带已发生明显淬硬。

火焰切割热影响区及远离火焰切割裂纹末端处  $T/2$  偏析带附近的硬度均显著高于其他位置硬度,即  $T/2$  偏析带具有较强淬硬倾向;因此,经分析认为  $T/2$  处存在合金元素、夹杂物富集,火焰切割过程中的高热量输入后快速冷却,导致  $T/2$  处形成硬脆马氏体并造成板厚方向切割面上出现局部的“硬化夹层”。

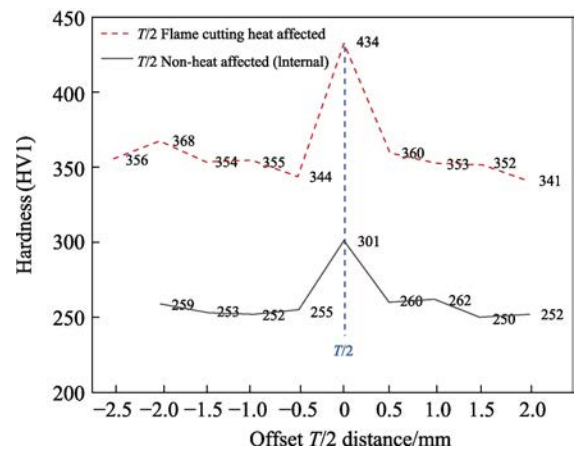
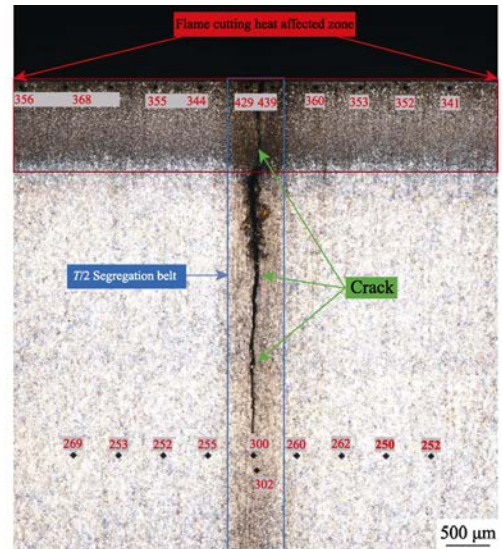


图8 试样1截面的硬度 (HV1) 测试点及数值分布  
Fig.8 Hardness test (HV1) position and results of 1# sample

### 4 化学成分

化学成分检测分为粉末取样及能谱分析两部分, 先在开裂位置钻取粉末进行检测, 再对开裂面进行能谱分析 (EDS), 验证成分是否变化, 根据检测结果分析开裂原因。

在板材非开裂位置  $T/2$  处取样, 使用  $\phi 5.0$  mm 钻头, 钻取金属粉末, 进行化学成分分析, 结果如表 2 所示。可得, 检测值在要求范围内, 无法确定  $T/2$  处

富合金元素的种类及程度, 这是由于偏析带尺寸较小 (约 0.1 mm), 采用机械加工方法取得的金属粉末量较大, 包含了大量非偏析区的金属粉末, 因此, 其分析结果与 Q690D 钢板原材料的平均成分含量接近, 检测无法得到偏析处成分的偏差。

为进一步分析  $T/2$  处富集元素的种类及程度, 采用微区成分测试, 利用能谱分析方法, 在微观金相试样上, 对  $T/2$  偏析带、偏析带附近和  $T/4$  处分别进行微区成分测试, 测试位置见图 9 (红色方框), 检测结果见表 3。

表 2 Q690D 钢板化学成分检测结果  
Tab.2 Chemical composition detection of Q690D steel plates

Comparison items	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	wt.%
Requirements value	$\leq 0.18$	$\leq 0.60$	$\leq 2.00$	$\leq 0.030$	$\leq 0.025$	0.01-0.11	0.01-0.12	0.006-0.050	
Detection value	0.10	0.25	1.37	0.014	0.003	0.02	0.04	0.013	
Comparison items	Cr	Ni	Cu	Mo	N	B	Alt	—	
Requirements value	$\leq 1.00$	$\leq 0.80$	$\leq 0.80$	$\leq 0.30$	$\leq 0.025$	$\leq 0.004$	$\geq 0.02$	—	
Detection value	0.29	0.033	0.031	0.26	0.007	0.001	0.023	—	

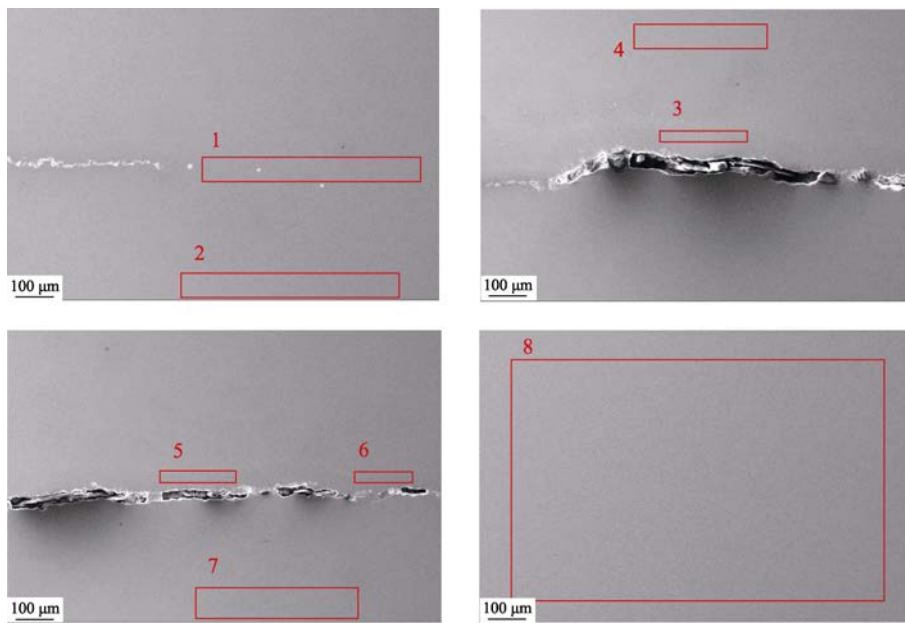


图 9 裂纹截面上的微区成分 EDS 测试位置  
Fig.9 Test position of micro-region component EDS test of crack section

表 3 微区化学成分 EDS 测试结果  
Tab.3 EDS test results of micro-region chemical composition

Location	Fe	Cr	Mn	Si	S	wt.%
1 (Segregation belt)	97.48	0.32	1.89	0.31	—	
2 (Near-segregation)	97.70	0.44	1.56	0.30	—	
3 (Segregation belt)	97.33	0.39	1.96	0.32	—	
4 (Near-segregation)	97.86	0.30	1.53	0.31	—	
5 (Segregation belt)	95.90	0.40	<u>2.86</u>	0.43	<u>0.42</u>	
6 (Segregation belt)	96.42	0.51	<u>2.32</u>	0.36	<u>0.40</u>	
7 (Near-segregation)	97.93	0.35	1.48	0.24	—	
8 ( $T/4$ Raw material)	97.77	0.36	1.58	0.29	—	

Note: The underline is the detection data obviously beyond the value of steel requirements value in Tab.2.

检测结果表明,  $T/2$  处偏析带(表3中编号1、3、5、6区域)中存在 Mn 元素富集, 质量分数平均值为 2.25% (高于表2中的平均值), 近偏析带(表3中编号2、4、7区域)中的 Mn 元素质量分数平均值为 1.53%,  $T/4$  处(表3中编号8区域)的 Mn 元素质量分数为 1.58%; 裂纹附近(编号5、6区域)有较高含量的 S 元素存在<sup>[22-23]</sup>, 证实了裂纹附近的 A 类夹杂物(硫化物)为  $MnS$ <sup>[24]</sup>, 同时说明 Mn 元素分别以固溶形式及  $MnS$  夹杂物形式存在<sup>[25]</sup>; 在近偏析带及  $T/4$  处的 EDS 结果中未见成分异常。

在试样的金属材料中, 固溶的合金元素增多, 增大了淬硬倾向, 夹杂物的聚集对材料性能产生不利影响。EDS 并非成分精确定量分析手段, 仅在一定条件下作为分析参考使用; 由于 EDS 测试结果表明, C 元素含量存在极大误差, 故此处不做分析, 但 C 元素会伴随合金元素发生偏析, 且 C 元素会显著增强金属淬透性、淬硬性, 因此可推断  $T/2$  处存在一定程度的 C 元素偏析并形成 D 类球状氧化物夹杂。

### 5 断口形貌

将编号2的试样进行正面弯曲, 制备成裂纹断口

试样, 利用扫描电子显微镜 (SEM) 进行断口形貌分析。图10为裂纹断口形貌, 断口整体表现为脆性开裂, 火焰切割表面的淬硬层断口为启裂区域, 可见启裂区与扩展部分的断口存在明显分界; 以火焰切割表面为起始面向内部分别选取3个特征区域(见图10)进行分析: ①区为表面淬硬层, 为脆性开裂, 其开裂前沿区域存在韧性撕裂; ②区为近表面区, 呈脆性沿晶断口特征, 此区域位于火焰切割的不完全正火区, 其沿晶断口应与该区的沿晶马氏体组织有关; ③区为断口内部, 呈穿晶解理断口特征, 体现为显著脆性特征。

分析可得零件原材料板材的裂纹为脆性开裂, 裂纹源在火焰切割面的  $T/2$  处, 并沿  $T/2$  成分偏析带向内部扩展, 可判断火焰切割是诱导偏析带裂纹萌生的原因之一; 热量使  $T/2$  偏析带处的淬硬组织进一步发展成为了内主筋板厚方向的“脆硬夹层”, 夹层为裂纹的发生和延展提供通道并最终造为  $T/2$  处开裂。

利用能谱仪 (EDS) 分析方法, 重新对断口微区进行成分检测(检测结果见表4, 测试位置见图10绿色框); 可见断口面发生了显著氧化, Mn 元素及杂质元素富集是成分偏析的起因, 其分析结果与金相开裂面(表3)的 EDS 分析结果一致, 均证明板材  $T/2$  处存在明显原始成分偏析。

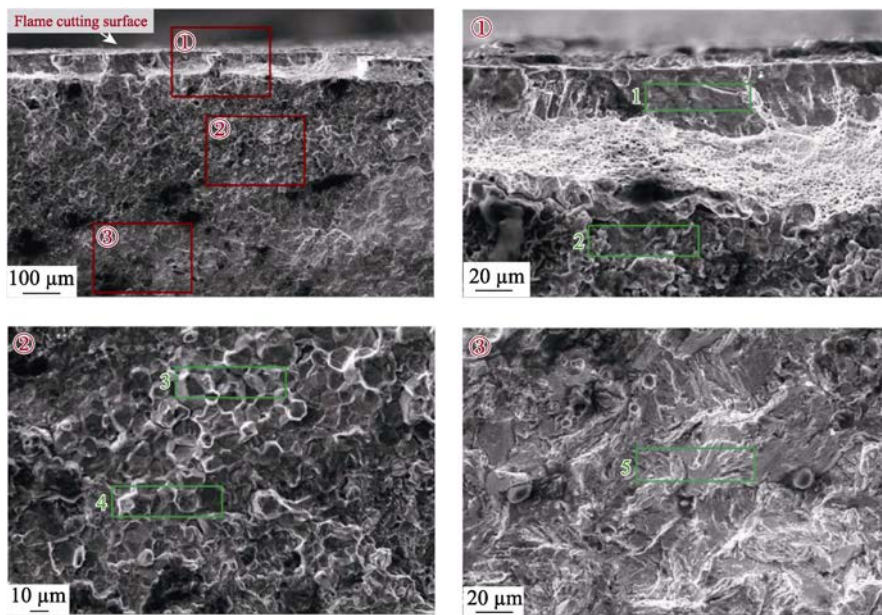


图10 SEM检测试样2断口形貌及EDS检测位置  
Fig.10 Fracture morphology of 2<sup>#</sup> SEM test sample and EDS test locations

表4 断口微区成分EDS检测结果  
Tab.4 EDS test results of fracture micro-region

Location	Fe	Cr	Mn	Si	Mo	O	P	S	wt. %
1	93.31	—	—	0.12	<u>0.52</u>	<u>5.97</u>	—	<u>0.08</u>	
2	85.78	0.69	<u>2.20</u>	0.18	—	<u>10.56</u>	<u>0.14</u>	<u>0.45</u>	
3	92.35	0.52	<u>2.62</u>	0.23	<u>0.59</u>	<u>3.51</u>	<u>0.18</u>	—	
4	89.41	0.37	<u>2.66</u>	0.21	0.09	<u>6.93</u>	<u>0.11</u>	<u>0.22</u>	
5	97.08	0.36	1.74	0.17	—	<u>0.65</u>	—	—	

Note: The underline is the detection data obviously beyond the value of steel requirements value in Tab.2.

## 6 结论

1) 液压支架底座内主筋火焰切割面的断续直线型缺陷为裂纹, 开裂处发生于火焰切割淬硬层与  $T/2$  偏析带交会处的“T 型”区域, 沿  $T/2$  偏析带由切割面向内部扩展, 深度约为 4.0 mm。

2) 主筋板材  $T/2$  处存在明显的原始成分偏析现象, 合金元素及夹杂物在偏析带中富集, 偏析及夹杂物经火焰切割热输入后的快冷作用产生淬硬层(切割面组织淬硬层硬度约 340HV1), 尤其  $T/2$  处脆硬特征异常显著(硬度 439HV1), 在板厚方向产生“硬化夹层”; 贴板及阀板焊接后, 厚度方向居中部位承受一定的  $z$  向(指厚度方向, 与钢板长度、宽度方向均垂直)拉伸应力,  $T/2$  偏析带的脆硬层进一步发生开裂并扩展。

3) 主筋板材  $T/2$  处开裂的内因如下: 原材料  $T/2$  偏析带中合金元素富集, 造成该区域淬硬性增强, 板厚方向不同层间的  $z$  向性能不均, 夹杂物的集中分布破坏了金属连续性, 进一步导致钢板  $z$  向性能降低。

### 参考文献:

- [1] 王国法, 刘峰, 孟祥军, 等. 煤矿智能化(初级阶段)研究与实践[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 1-36.  
WANG G F, LIU F, MENG X J, et al. Research and Practice on Intelligent Coal Mine Construction(Primary Stage)[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 1-36.
- [2] 张立宽. 改革开放 40 年我国煤炭工业实现三大科技革命[J]. 中国能源, 2018, 40(12): 9-13.  
ZHANG L K. China's Coal Industry Realizes Three Scientific Revolutions during the Past 40 Years[J]. Energy of China, 2018, 40(12): 9-13.
- [3] 王国法, 张德生. 煤炭智能化综采技术创新实践与发展展望[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(3): 459-467.  
WANG G F, ZHANG D S. Innovation Practice and Development Prospect of Intelligent Fully Mechanized Technology for Coal Mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(3): 459-467.
- [4] 马春雨. 煤矿综采工作面智能化开采探讨[J]. 内蒙古煤炭经济, 2024(11): 34-36.  
MA C Y. Discussion on Intelligent Mining in Fully Mechanized Coal Mining Face[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2024(11): 34-36.
- [5] 康红普, 徐刚, 王彪谋, 等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展 40 a 及展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1(2): 7-39.  
KANG H P, XU G, WANG B M, et al. Forty Years Development and Prospects of Underground Coal Mining and Strata Control Technologies in China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(2): 7-39.
- [6] 王国法, 徐亚军, 张金虎, 等. 煤矿智能化开采新进展[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 1-10.  
WANG G F, XU Y J, ZHANG J H, et al. New Development of Intelligent Mining in Coal Mines[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 1-10.
- [7] 栾占军, 高凡刚, 关虎. 锥体类截割头截齿座自动焊接技术[J]. 煤炭与化工, 2024, 47(6): 88-93.  
LUAN Z J, GAO F G, GUAN H. Automatic Welding Technology of Conical Cutting Head Pick Holder[J]. Coal and Chemical Industry, 2024, 47(6): 88-93.
- [8] 孙传虎. 液压支架顶梁人机混合焊接兼容性分析[D]. 宁夏: 宁夏大学, 2022: 1-5.  
SUN C H. Compatibility Analysis of Man-machine Hybrid Welding of Hydraulic Support Top Beam[D]. Ningxia: Ningxia University, 2022: 1-5.
- [9] 裴守魁, 张佼, 银升超, 等. 机器人连贯焊接在液压支架结构件上的应用[J]. 煤矿机械, 2023, 44(7): 147-150.  
PEI S K, ZHANG J, YIN S C, et al. Application of Robot Continuous Welding in Hydraulic Support Structure[J]. Coal Mine Machinery, 2023, 44(7): 147-150.
- [10] 时宗林, 刘广文, 何海洋, 等. 液压支架自动化组装技术的研究与应用[J]. 煤矿机械, 2024, 45(9): 97-99.  
SHI Z L, LIU G W, HE H Y, et al. Research and Application of Automated Assembly Technology for Hydraulic Support[J]. Coal Mine Machinery, 2024, 45(9): 97-99.
- [11] 李涛. 液压支架顶梁、掩护梁装配工艺及平台的研究与应用[J]. 煤矿机械, 2023, 44(7): 95-97.  
LI T. Research and Application of Assembling Technology and Platform of Hydraulic Support Top Beam and Shield Beam[J]. Coal Mine Machinery, 2023, 44(7): 95-97.
- [12] 冯耀东. 液压支架侧护板拆装机机械手的研究及设计[J]. 煤矿机械, 2022, 43(12): 4-6.  
FENG Y D. Research and Design of Manipulator for Dismantling and Assembling Side Shield of Hydraulic Support[J]. Coal Mine Machinery, 2022, 43(12): 4-6.
- [13] 姬炎涛, 于礼军, 吴成峰, 等. Q690D 结构件焊后免退火工艺研究[J]. 煤矿机械, 2021, 42(8): 103-105.  
JI Q T, YU L J, WU C F, et al. Research on Annealing-Free Process after Welding of Q690D Structure[J]. Coal Mine Machinery, 2021, 42(8): 103-105.
- [14] 李冬毓, 王嘉睿, 孙万田. LNG 储罐用钢 06Ni9DR 焊接接头弯曲试验断裂失效分析[J]. 压力容器, 2023, 40(8): 74-78.  
LI D Y, WANG J R, SUN W T. Fracture Failure Analysis of 06Ni9DR Steel Welded Joint for LNG Storage Tank in Bending Test[J]. Pressure Vessel Technology, 2023, 40(8): 74-78.
- [15] 牛庆伟, 郝敬宾, 纪皓文, 等. 超声辅助激光熔覆 IN 625 高温合金涂层组织及性能研究[J]. 精密成形工程, 2024, 16(2): 137-148.  
NIU Q W, HAO J B, JI H W, et al. Microstructure and

- Properties of IN 625 High-Temperature Alloy Coating by Ultrasonic Assisted Laser Cladding[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2024, 16(2): 137-148.
- [16] 关建辉, 曲锦波, 丁美良, 等. 热连轧高碳带钢 65Mn 边裂原因分析及改进[J]. *中国冶金*, 2024, 34(4): 145-152.
- GUAN J H, QU J B, DING M L, et al. Cause Analysis and Improvement of Edge Crack in Hot Continuous Rolling High Carbon Strip Steel 65Mn[J]. *China Metallurgy*, 2024, 34(4): 145-152.
- [17] MOROHOSHI T, ZEZE M. Effect of Silicon Content in Steel on the Formation of Titanium Nitride and Solidification Structure[J]. *Tetsu-to-Hagane*, 2013, 99(3): 191-197.
- [18] LIANG W, WU R, YUAN Q, et al. Investigation on Precipitation Behavior and Morphology of TiN Particles in High-Ti Low-Carbon High-Strength Steel[J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2020, 73(1): 151-159.
- [19] 沈昶, 杨峥, 郭俊波, 等. MnS 在固态低硫钢中析出的实验室研究[J]. *炼钢*, 2022, 38(1): 49-55.
- SHEN C, YANG Z, GUO J B, et al. Laboratory Study on Precipitation of MnS in Solid Low Sulfur Steel[J]. *Steelmaking*, 2022, 38(1): 49-55.
- [20] 梁文, 张王辉, 龙志伟, 等. 700 MPa 级厚规格高强钢板剪切分层原因分析[J]. *上海金属*, 2023, 45(1): 12-19.
- LIANG W, ZHANG W H, LONG Z W, et al. Analysis on Shearing Delamination of 700 MPa Grade Heavy-Gauge High-Strength Steel Plate[J]. *Shanghai Metals*, 2023, 45(1): 12-19.
- [21] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 钢中非金属夹杂物含量的测定 标准评级图显微检验法: GB/T 10561—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of Content of Nonmetallic Inclusions in Steel-Micrographic Method Using Standard Diagrams: GB/T 10561—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [22] 姬庆涛, 化三兵, 王瑶, 等. Q345 钢焊接裂纹分析[J]. *热加工工艺*, 2013, 42(9): 232-233.
- JI Q T, HUA S B, WANG Y, et al. Analysis on Welding Crack in Q345 Steel[J]. *Hot Working Technology*, 2013, 42(9): 232-233.
- [23] 杨建勋, 杜显彬, 李广艳, 等. 800 MPa 级低碳贝氏体高强钢板拉伸断口分层机理[J]. *金属热处理*, 2012, 37(9): 40-44.
- YANG J X, DU X B, LI G Y, et al. Tension Fracture Delamination Mechanism of 800 MPa Grade Low Carbon Bainitic High Strength Steel Plate[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2012, 37(9): 40-44.
- [24] 李艳梅, 朱伏先, 崔凤平, 等. 中厚钢板分层缺陷的形成机制分析[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2007, 28(7): 1002-1005.
- LI Y M, ZHU F X, CUI F P, et al. Analysis of Forming Mechanism of Lamination Defect of Steel Plate[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2007, 28(7): 1002-1005.
- [25] DOMIZZI G, ANTERI G, OVEJERO-GARCÍA J. Influence of Sulphur Content and Inclusion Distribution on the Hydrogen Induced Blister Cracking in Pressure Vessel and Pipeline Steels[J]. *Corrosion Science*, 2001, 43(2): 325-339.