DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.05.019

阀座激光熔覆层开裂原因分析

杨成新[1],张绪亮[1],杜志杰[2],张春婉[2],王鹏程[1]
(1. 中国石油塔里木油田分公司,新疆 库尔勒 841000;2. 西安摩尔石油工程实验室股份有限公司,陕西 西安 710065)

摘　要:某井在检修时发现阀座表面存在裂纹,通过化学成分测试、力学性能试验、宏观/微观观察等手段,对该阀座开裂的原因进行分析。结果表明,阀座表面熔覆层组织为柱状晶,裂纹沿柱状晶扩展,为解理特征;而其他未开裂的熔覆层的组织均为等轴晶。阀座表面熔覆层开裂主要由于熔覆工艺不合理,产生大量柱状晶,导致熔覆层硬而脆,韧性差,在振动工况下,熔覆层开裂。

关键词:阀座;熔覆层;柱状晶
中图分类号:TG174　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)05-0407-05

Cracking Cause Analysis of Valve Seat Laser Clad Layer

YANG Chengxin[1], ZHANG Xuliang[1], DU Zhijie[2], ZHANG Chunwan[2], WANG Pengcheng[1]
(1. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China; 2. Xi'an Maurer Petroleum Engineering Laboratory Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: A crack was found on the surface of the valve seat in the maintenance of an oil well. The cause of the cracking of the valve seat was analyzed with chemical composition test, mechanical performance test, macro/micro observation and other means. The results show that the structure of the cladding layer on the surface of the valve seat is columnar grain, and the crack propagation along the columnar grain is cleavage characteristic. The microstructure of other uncracked cladding layers is equiaxed crystal. Cracking of cladding layer on valve seat surface is mainly due to unreasonable cladding process, which produces a large number of columnar crystals, resulting in hard and brittle cladding layer, poor toughness, and cracking of cladding layer under vibration condition.
Key words: valve seat; cladding layer; columnar crystal

激光熔覆技术是一项新兴的零件加工与表面改性技术,该技术是利用高能密度的激光束将具有不同成分、性能的合金与基材表面快速熔化,在基材表面形成与基材完全不同成分和性能合金层的快速凝固过程[1]。为提高阀门使用寿命,需要对阀门密封面材料进行选择并且对阀门密封面进行表面强化处理。阀门密封面的表面熔覆不需要阀门整体采用成本较高的材料加工制造,只需借助某种热源手段将特殊使用性能的合金材料熔覆在阀门密封面,就可以使阀门密封面拥有耐磨损、抗腐蚀、硬度高、抗刮伤、耐高温等特殊性能[2]。

某井在储层改造作业后检修发现阀座熔覆层存在裂纹。该阀座规格为:KQ 78/65-105 MPa(EE)。2019 年 11 月 20 日供井,2020 年 1 月 20 日拆卸,进行了加沙压裂作业,但压力未超过 72 MPa,回收后检修时发现阀座有长度 25 mm 裂纹。该阀板温度级别:P~U 级(-29 ℃～+121 ℃),材料等级:EE 级,规范级别:PSL3,性能级别:PR1。为了明确阀座开裂的主要原因,对开裂阀座样品和其他未开裂阀座样品进行分析。

1　宏观分析

图 1 为阀座的宏观形貌与渗透探伤结果。可以看出,阀座熔覆层存在 2 条径向裂纹,裂纹均由通孔扩展至外侧倒角部位。

2　维氏硬度试验

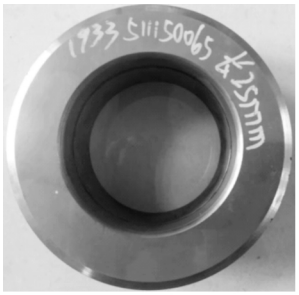
维氏硬度试验采用高度为 15 mm 的硬度块,试验结果列于表 1。可以看出,熔覆层的硬度值远高于热影响区和基体,最高可达 555.9 HV。

表 1 维氏硬度试验结果
Tab.1 Vickers hardness test results

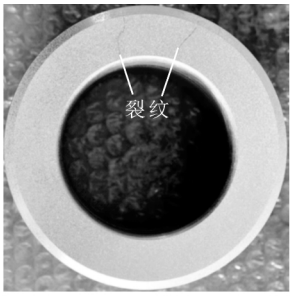
位 置	维氏硬度值(HV_{10})		
熔覆层	527.8	555.9	539.5
热影响区	161.0	156.0	161.2
基 体	149.4	150.1	151.2

收稿日期:2021-03-05
作者简介:杨成新(1966—),新疆库尔勒人,本科,高级工程师.主要从事钻井工程方面的工作.电话:0996-2172108,Email:yangcx-tlm@petrochina.com.cn

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)阀座



(b)渗透探伤结果

(c)裂纹

图 1 阀座与渗透探伤结果

Fig.1 The Valve seat and the results of penetrant test

3 金相组织

3.1 阀座基体

在阀座基体上取样，金相显微镜下观察其金相组织，为马氏体+残余奥氏体，形貌见图 2。

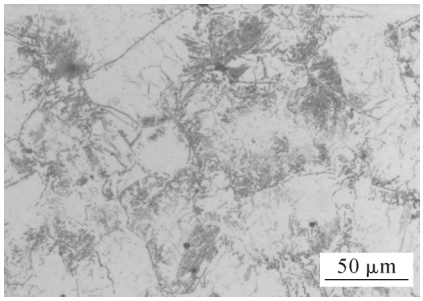


图 2 阀座基体的金相组织

Fig.2 Microstructure of valve seat body

3.2 阀座熔覆层

在该阀板熔覆层上取样，金相显微镜下观察其金相组织如图 3 所示。其中的白色相为奥氏体，灰色为弥散相，黑色为析出的硬质相。对各相进行显微硬度测试，测试结果见表 2，测试位置见图 4。

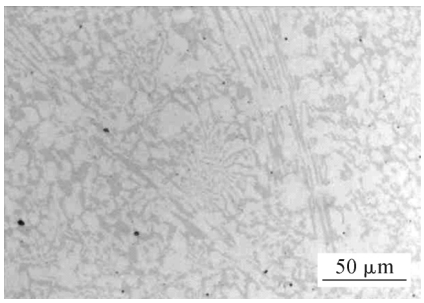


图 3 熔覆层的金相组织

Fig.3 The microstructure of the cladding layer

表2 不同物相显微硬度测试结果

Tab.2 Micro-hardness test results of different phases

位置	显微硬度($HV_{0.01}$)
白色相 1	470
白色相 2	426
黑色相	1 167
灰色相	720

4 微观分析

在熔覆层结合面部位取样，金相显微镜下观察其形貌，发现熔覆层与基体熔合较好，无气孔缺陷，熔覆层的组织为柱状晶，形貌见图 5。

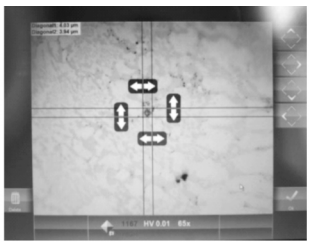
在裂纹部位取样，金相显微镜下观察裂纹形貌，并将裂纹进行拼接，如图 6 所示。可以看出，该部位两条裂纹未在同一截面内扩展，一条裂纹在外壁处间隙最宽，推测该裂纹起源于外壁；另一条裂纹中部间隙较宽，推测该裂纹起源于熔覆层中心；经测量，熔覆层厚度为 2.37 mm。金相腐蚀后，发现熔覆层裂纹沿柱状晶扩展。

图 7 为裂纹打开后的断口形貌。可以看出，阀座熔覆层的断口微观形貌为解理特征，属脆性断裂；解理面为长条形，结合上述金相组织，发现这些长条形解理面正好与柱状晶的形态相对应。

对熔覆层断口进行能谱分析，分析位置见图 8，结果见表 3。由结果可知，熔覆层主要含有 Cr、Co、C、W、Fe 等元素。

(a)白色相1

(b)白色相2



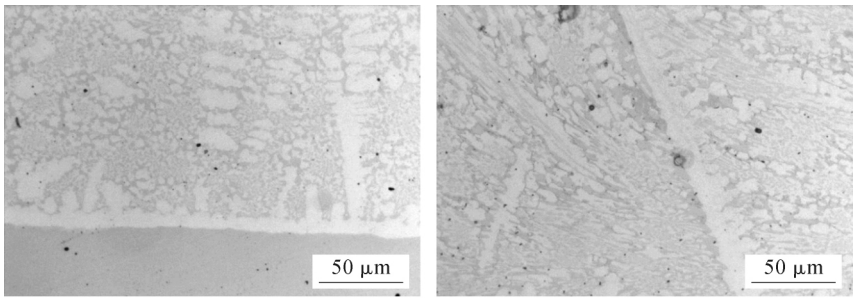
(c)黑色相

(d)灰色相

图 4 不同物相显微硬度测试结果

Fig.4 Micro-hardness test result of different phases

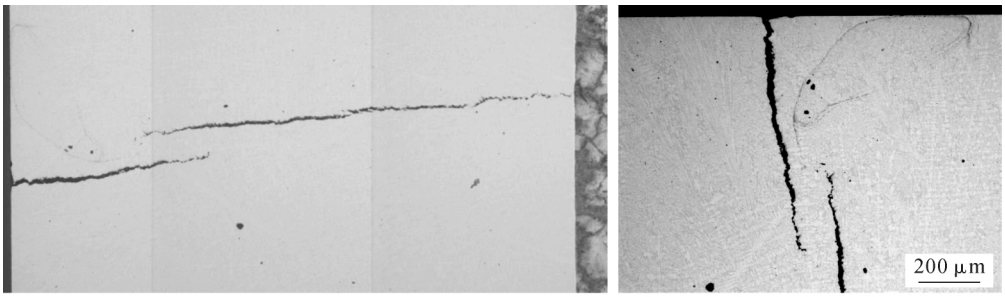
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)结合界面　　(b)熔覆层

图 5 熔覆层结合界面处的微观组织

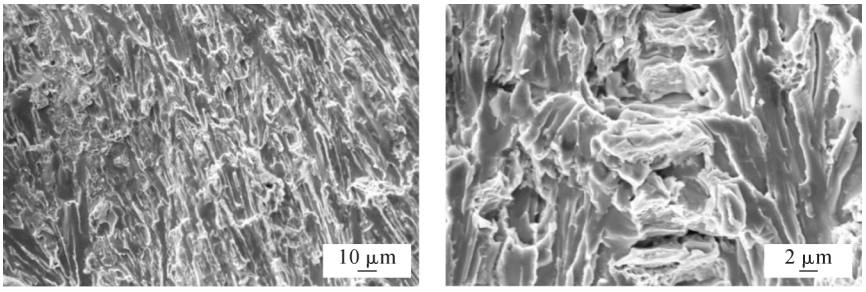
Fig.5 Microstructure of interface between cladding layer and matrix



(a)裂纹宏观形貌　　(b)金相腐蚀后的裂纹形貌

图 6 熔覆层裂纹形貌

Fig.6 Crack morphology of cladding layer



(a)低倍　　(b)高倍

图 7 断口形貌

Fig.7 Fracture morphology

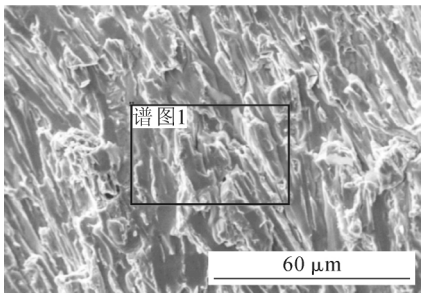


图 8 熔覆层能谱分析位置

Fig.8 The position of the energy spectrum analysis of the cladding layer

表3 熔覆层能谱分析结果

Tab.3 Energy spectrum analysis results of cladding layer

元素	C	Cr	Fe	Co	W	总量
w(%)	14.25	38.00	8.69	28.00	11.06	100
a(%)	45.49	28.02	5.97	18.22	2.31	100

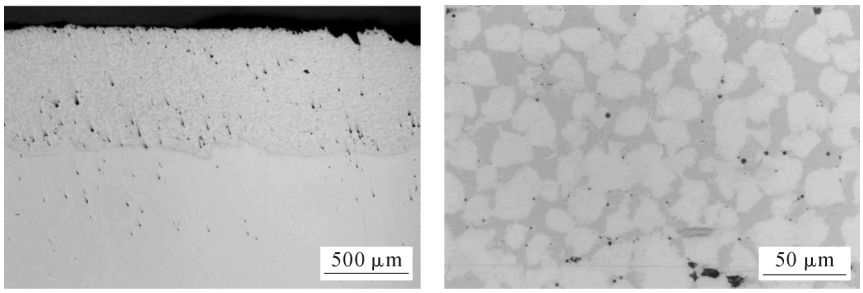
5 未开裂阀座金相分析

对未开裂阀座的熔覆层进行金相分析，发现这些未开裂阀座的熔覆层较薄，且全为等轴晶，形貌见图 9~ 图 13。测量各阀座熔覆层的厚度，结果见表 4。由结果可知，这些未开裂熔覆层的厚度均小于开裂熔覆层，最薄可达 0.70 mm，是开裂熔覆层（2.37 mm）的 29.5%。

6 分析讨论

宏观分析表明，阀座端面存在 2 条裂纹，裂纹均由通孔扩展至外侧倒角部位。裂纹位于熔覆层内，未扩展至阀座基体。硬度分析表明，熔覆层硬度远高于基体和热影响区，最高可达 555.9 HV。金相分析表明，阀座基体组织为马氏体+残余奥氏体，熔覆层组织为柱状晶。微观分析表明，熔覆层厚度为 2.37 mm；熔覆层与基体熔合较好，无气孔缺陷；熔覆层的组织为柱状晶，裂纹沿柱状晶扩展，断口微观形貌为解理特征，属于脆性断裂。解理面为长条形，正好与柱状晶的形态相对应。显然，熔覆层的开裂与

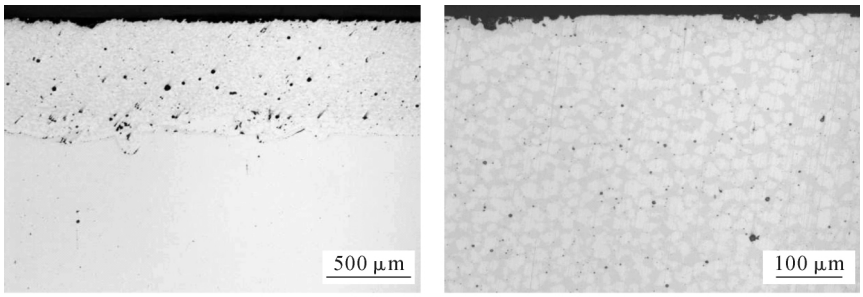
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)低倍　　(b)高倍

图 9　1# 未开裂阀座熔覆层的金相组织

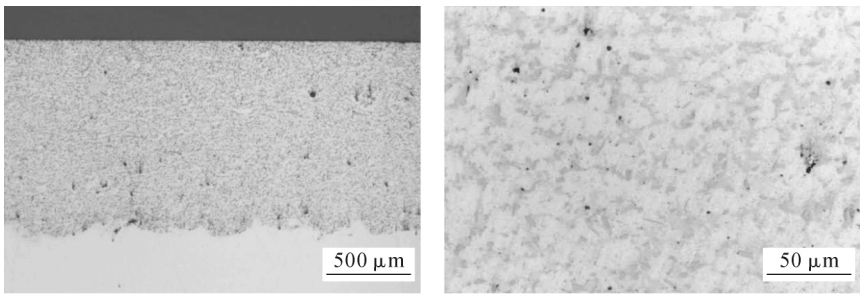
Fig.9　Microstructure of 1# uncracked valve seat cladding layer



(a)低倍　　(b)高倍

图 10　2# 未开裂阀座熔覆层的金相组织

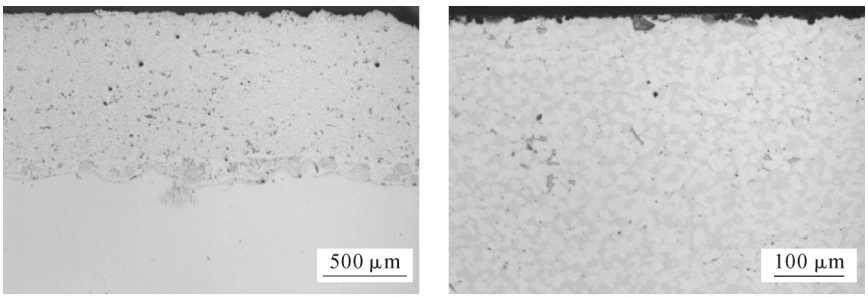
Fig.10　Microstructure of 2# uncracked valve seat cladding layer



(a)低倍　　(b)高倍

图 11　3# 未开裂阀座熔覆层的金相组织

Fig.11　Microstructure of 3# uncracked valve seat cladding layer



(a)低倍　　(b)高倍

图 12　4# 未开裂阀座熔覆层的金相组织

Fig.12　Microstructure of 4# uncracked valve seat cladding layer

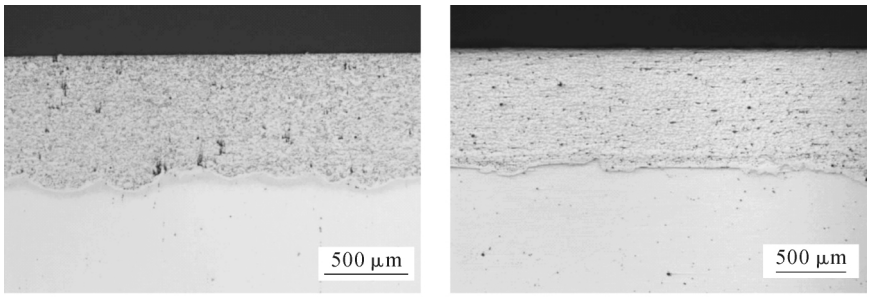
柱状晶组织存在直接关联。

下面对该阀座的开裂原因进行分析：

（1）阀座熔覆层与基材熔合较好，未发现气孔缺陷；而且熔覆层表面的裂纹间隙最大，结合界面的裂纹间隙较小，推知该熔覆层开裂起源于外表面，由外向内扩展。

（2）熔覆层柱状晶组织是其开裂的主要因素。金相分析表明，裂纹沿柱状晶扩展；断口的微观形貌为解理特征，解理面为长条形，与柱状晶的方向、形态一致。因此推测柱状晶组织是该阀座熔覆层开裂的主要原因。柱晶间界是杂质、气泡、缩孔较富集的区域，为脆弱结合面，在服役过程中，这些脆弱结合

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)5#低倍　　(b)6#低倍

图 13　5# 和 6# 未开裂阀座熔覆层的金相组织

Fig.13　Microstructure of 5# and 6# uncracked valve seat cladding layer

表 4 熔覆层厚度测量结果

Tab.4 Measurement results of cladding layer thickness

样品编号	1#	2#	3#	4#	5#	6#
熔覆层厚度 /mm	0.70	0.73	1.25	1.06	0.83	0.78

面已发生开裂。

(3)熔覆层受到较大的残余拉应力作用。熔覆层与基体材料的热膨胀系数不同，并且在激光熔覆过程中形成较大温度差，当熔池部位被急剧加热，然后迅速膨胀之后，熔覆层与基体材料经过凝固、收缩及冷却，产生收缩变形，而此时基体收缩相对较小，并且熔覆涂层与基体之间呈冶金结合，故熔覆层受到基体较大的拉应力作用。

(4)散热的方向性是熔覆层柱状晶形成的原因。柱状晶的长大速度与已凝固固相的温度梯度和液相的温度梯度有关，固相的温度梯度越大，或者液相的温度梯度越小，则柱状晶的长大速度便越大。已结晶固相的导热性好，散热速度快；较高熔覆功率下，熔池内液相较长时间吸收激光能量，散热速度慢，是熔覆层形成柱状晶的原因。

(5)开裂阀座覆熔层厚度远大于其他未开裂阀座，与柱状晶的形成也有一定的关联。刘怀喜等人研究不同送粉速度对熔覆层厚度的影响[3]，熔覆功率为 3 kW，扫描速度 2 mm/s，送粉速度在 0.15 g/s< ν<0.40 g/s 时，能达到良好的熔覆层，且厚度随送粉速度增加而增加，$\nu \geq 0.40$ g/s 时，出现未熔颗粒，有较厚的熔覆层表面粗糙，甚至出现裂纹，详情见表5。

表 5 不同送粉速度形成的熔覆层厚度与表面状态

Tab.5 Thickness and surface state of the cladding layer formed by different powder feeding speeds

样品编号	1	2	3	4	5	6	7	8
送粉速度 /(g/s)	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
熔覆层厚度 /mm	0.27	0.89	1.21	1.62	1.87	2.01	2.08	2.11
表面状态	基体过分熔化表面粗糙	有一定厚度的熔覆表层表面质量良好				有较厚的熔覆层表面粗糙		出现表面裂纹

阀座熔覆层较厚，但熔覆层表面质量良好，据此推测，熔覆功率较高，单位时间内单位面积所吸收的能量较高，相应的温度也较高，其散热的均匀性较差，熔覆层壁厚方向散热最快，晶体沿其相反方向择优生长成柱状晶。未开裂熔覆层较薄，单位面积吸收的能量相对较低，散热失去了方向性，晶核在液体中可以自由生长，在各个方向上的长大速度差不多相等，因此就长成了等轴晶[4]。另外，刘怀喜等的研究结果表明，45 钢激光熔覆 NiO_2D 镍基合金时，一次熔覆所能形成的最大厚度有一定限度，超出此值易引起熔覆层表面产生裂纹[3]。

根据上述分析，可推知该阀座开裂的主要原因为：激光熔覆工艺不合理，导致阀座表面的熔覆层组织为柱状晶，韧性差，容缺陷能力较差；熔覆层较厚，表面存在较大的残余拉应力；在服役过程中冲击振动载荷作用下，熔覆层表面发生脆性开裂。

7　结论

阀座端面熔覆层内出现开裂，其开裂机理为脆性断裂。主要原因为：激光熔覆工艺不合理，导致阀座表面的熔覆层组织为柱状晶，韧性差，容缺陷能力较差；熔覆层较厚，表面存在较大的残余拉应力；在服役过程中冲击振动载荷作用下，熔覆层表面发生脆性开裂。

参考文献：

[1]　陈瑶，周波. 激光熔覆技术[J]. 河南科技，1998(2)：20-21.

[2]　姜小霞. 激光熔覆三偏心蝶阀阀板硬密封面关键技术研究[D]. 温州大学硕士学位论文，2018.

[3]　刘怀喜，闫耀晨，马润香，等. 激光熔覆 Ni 基合金的工艺和组织研究[J]. 机械工程材料，2003(27)：33-34.

[4]　崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京：机械工业出版社，2004.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net