

城市处置危险废物固体泵闸板断裂失效机理研究

郭光明

北京市科学技术研究院智能装备研究所 北京 100061

摘要: 城市处置危险废物是国家解决危险废物问题的重点项目,开展闸板断裂失效分析研究,不仅为危险废物处置行业进行产品设计提供了基础数据,而且打破了国外设备在国内的垄断。研发出替代进口的核心零部件可以降低危废处置企业的维护成本。首先分析固体泵闸板断裂失效产生的裂纹,对断口进行宏观形貌观察、材料化学成分测定、力学性能检测、硬度测量、金相分析、SEM形貌分析,在闸板的横向、纵向剖面 and 裂纹源处凹坑均呈现显微疏松特征,然后根据断口基本形态判定是由于残余内应力造成断裂失效,再基于有限元仿真研究论证材料强度是否满足设计要求,得出应力集中位置螺纹处和圆弧刃处是易发生断裂的位置。最后优化设计机械结构和热处理工艺,采用去机械加工应力、深冷和多次回火工艺,新闸板能够完全满足性能需求,工程应用中再未发生闸板断裂失效问题。

关键词: 固体泵; 闸板; 断裂失效; Cr12Mo1V1; 裂纹

Failure mechanism of the gate of the solid pump for urban hazardous waste disposal

GUO Guangming

Beijing Academy Science and Technology, Intelligent Equipment Research Institute, Beijing 100061, China

Abstract: Urban disposal of hazardous waste is a key project for the country to solve the problem of hazardous waste. Conducting analysis and research on gate fracture failure not only provides basic data for product design in the hazardous waste disposal industry, but also breaks the monopoly of foreign equipment in China. Developing core components to replace imports can reduce maintenance costs for hazardous waste disposal enterprises. This project first analyzes the cracks of fracture failure of solid pump gate plates. Macroscopic morphology observation, material chemical element determination, mechanical properties, hardness measurement, metallographic analysis, and SEM morphology analysis are carried out on the fracture surface. The transverse and longitudinal sections of the gate plate and the pits at the grain source show obvious loose characteristics. Then, based on the basic morphology of the fracture surface, it is determined that the fracture failure was caused by residual internal stress. Based on finite element simulation research to demonstrate whether the material strength meets the design requirements. At the same time, it is found that the stress concentration position at the thread and the circular arc edge are the locations where fracture is prone to occur. Finally, the mechanical structure and heat treatment process were optimized, and the new gate was able to fully meet performance requirements by using stress reduction, deep cooling, and multiple tempering processes. No gate fracture failure occurred in engineering applications.

Keywords: solidpump; gate; fracture failure; Cr12Mo1V1; crack

基金项目:北京市科学技术研究院财政资助项目(24CB008-02)。

1 序言

危险废物膏体通常黏度大、流动性差，一般储存在铁桶、塑料桶或编织袋内，采用破碎（Shredding）、混合（Mixing）和泵送（Pumping）（简称SMP）的工艺将危险废物膏体管道输送到焚烧窑进行焚烧处理，是目前最有效的处理危险废物的方法^[1-3]。该方法在我国得到了广泛应用，2015年起，我国陆续从瑞士SIDSA公司引进了400多套SMP系统^[4]。该系统基本垄断了中国城市协同处置危险废物膏体生产线，其中固体泵可以实现远距离泵送黏稠的危险废物膏体^[5]。固体泵的闸板在设备调试及运行期间多次发生了断裂失效，造成了设备停产检修^[6]。

从瑞士进口的固体泵闸板采用Cr12Mo1V1钢，该材质作为一种高碳高铬莱氏体型冷作模具钢，其碳含量高、合金元素多，钢中存在大量的碳化物，具有高硬度、高耐磨性、良好韧性和抗变形性能；但其脆性大、变形抗力大、锻造温度范围较窄、脱碳倾向大，以及存在大量偏析严重的共晶碳化物等缺点，容易发生断裂失效，因此国内外学者开展了相关研究工作。代玉杰^[7]指出，卡簧冲头断裂失效是由于Cr12Mo1V1钢中共晶碳化物偏析严重，呈带状分布，同时存在尖角状、大块状碳化物，从而导致卡簧冲头在使用过程中发生早期断裂失效。张国强等^[8]研究了Cr12Mo1V1冷作模具钢在经过热处理、焊接、磨削后，静置时产生脆性开裂现象，其主要原因是由模具后续焊接不良以及未消除焊接应力引起的。侯彩云等^[9]提出Cr12MoV钢模具的断裂原因是材料中共晶碳化物呈网状分布，同时存在锋利、尖角块状碳化物，二者共同作用导致模具断裂。贺凯林^[10]研究了Cr12钢模具发生脆性断裂的原因是材料中的带状组织和大块分布的碳化物严重降低了材料的韧性，以及线切割后残留的未回火马氏体，最终导致模具断裂。赵昌盛^[11]进行了Cr12系钢冷作模具断裂失效分析，其原因是模具锻后未进行球化退火，粗大晶粒未得到细化，网状碳化物也未能很好地消除，因此在模具加工成形后经淬火、回火仍有针状马氏体并伴有网状碳化物。因此，本文首先分析固体泵闸板断裂失效产生的裂纹，对断口进行宏观形貌观察、化学成分分析、力学性能检测、金相检验和断面SEM形貌分析，然后基于有

限元对闸板进行力学分析，最后提出机械结构优化设计及热处理优化方法，从而解决闸板断裂失效的问题。

2 理化试验研究

2.1 固体泵闸板

固体泵是一种特殊的单柱塞泵，主要用于管道输送固体含量高、非常黏稠且含有异物的膏体物料。采用固体泵进行管道输送危险废物，能够最大程度地减少人员与危险废物的接触，保障人身安全。图1所示为固体泵的机械结构。由图1可知，物料液压缸12主要用于推动柱塞头16，将危险废物推送进入管道，闸板液压缸12用于控制闸板1，实现固体泵与管道之间通断功能，闸板打开时，危险废物被推送进入管道，闸板关闭时，管道内的危险废物不能返流回来。

固体泵的工作原理如下：当物料液压缸向后退至最末端时等待数秒，物料由预压螺旋喂料器及重力作用下进入进料口8；物料液压缸向前挤压物料，保证泵体耐磨内圆筒19内物料充满；打开闸板，泵体耐磨内圆筒与管道相通；物料液压缸向前推送物料至闸板位置，物料被挤压进入管道；物料液压缸向前推送物料至闸板位置，物料被挤压进入管道；关闭闸板，防止泵体耐磨内圆筒与管道相通。

固体泵主要技术参数为吸料与排料速度：0~0.15m/s；电动机功率：132kW；物料液压缸：缸径0.24m，杆径0.13m，行程1.42m，料缸行程为0.66m，柱塞头直径：0.35m；系统压力：25MPa。

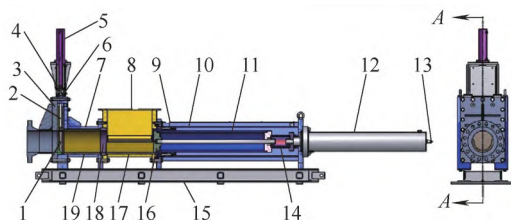


图1 固体泵机械结构

1—闸板 2—闸板柱塞杆 3—闸盖 4—闸板柱塞联结块 5—闸板液
压缸 6—闸板密封系统 7—泵体 8—进料口 9—主柱塞密封系
统 10—柱塞导向筒 11—主柱塞 12—物料液压缸 13—液压缸位
置传感器 14—联结管 15—底座 16—柱塞头 17—进料半圆筒
18—切割环 19—泵体耐磨内圆筒

固体泵每一个工作循环，闸板都需要上下滑动，实现开闭功能。当关断时遇到铁皮等异物，闸

板需要依靠底部圆弧刃口进行切断。该闸板采用厚度50mm的Cr12Mo1V1钢板生产,首先粗加工出底部圆弧刃口和上部吊装用螺纹孔,然后进行真空淬火和1~2次200℃回火处理,从而达到硬度58~62HRC,最后磨削加工大平面后线切割出2个T形槽。

图2a所示为闸板底部产生碎片式脱落,并贯穿螺纹孔产生了纵向断裂。图2b所示为在圆弧刃的上端产生了横向裂纹,图2c所示为在圆弧刃的下端产生了横向裂纹,图2d所示为所有裂纹失效汇总。由图2可见,发生断裂的主要集中在横向与纵向断裂。由图2b、2c可见,闸板工作不久便发生了约20cm长的横向裂纹,裂纹未完全贯穿闸板,但该闸板已经

无法使用,只能停机检修。鉴于3处裂纹都是脆性断裂,失效机理大致相同,因此选取图2c圆弧刃下端横向裂纹开展断裂失效分析研究。

2.2 断口宏观形貌观察

固体泵闸板未经使用便发生开裂。失效闸板宏观形貌如图3a所示,裂纹位于闸板中部圆弧刃处,从闸板边缘R角处向内部延伸,裂纹肉眼可见,长约22cm,如图3b所示,裂纹最宽约0.6mm,如图3c所示。裂纹开口处较宽,说明闸板在开裂前的残余内应力较大。将闸板裂纹打开并清洗后观察,裂纹断面无明显塑性变形,裂纹起始处观察到半圆形锈斑,为开裂源区,源区处存在一个锈迹,近锈斑处可观察到明显的扩展条纹,如图3d所示。

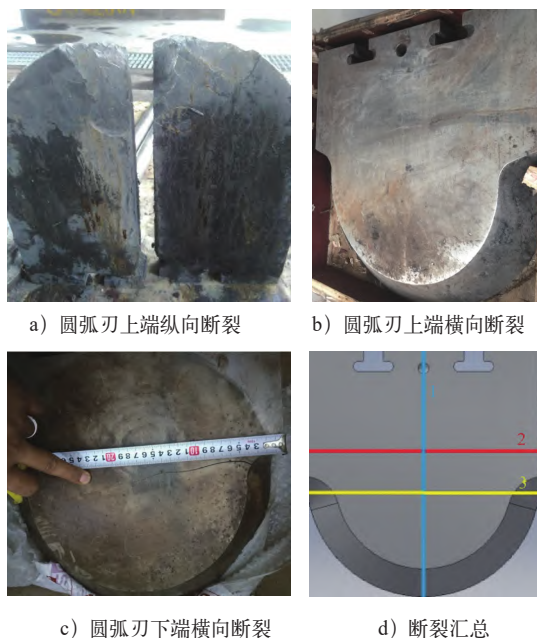


图2 闸板断裂位置

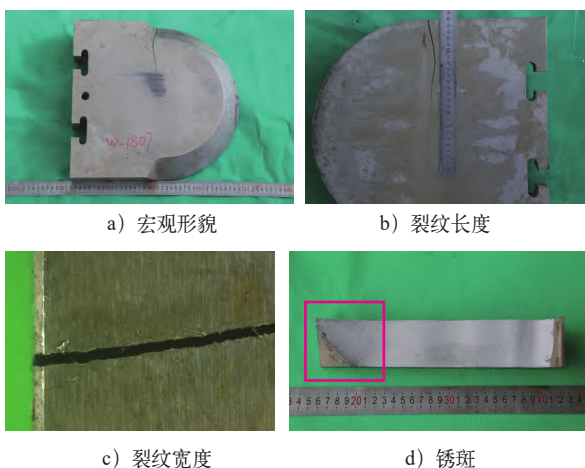


图3 闸板宏观形貌及失效位置示意

2.3 化学成分分析

对Cr12Mo1V1钢闸板进行化学成分分析,其分析结果见表1,符合GB/T 1299—2000《合金工具钢》技术要求。

表1 Cr12Mo1V1钢化学成分分析结果(质量分数)

(%)

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
测试样	1.54	0.28	0.35	0.023	0.002	11.00	0.74	0.72
技术要求	1.40~1.60	≤0.60	≤0.60	≤0.030	≤0.030	11.00~13.00	0.70~1.20	0.50~1.10

2.4 力学性能检验

闸板力学性能分析结果见表2,抗拉强度为1194MPa,屈服强度为1049MPa,断后伸长率仅为1%,可见经过真空淬火后的Cr12Mo1V1钢闸板强度高、韧性差。洛氏硬度测试结果见表3。经过3次测量硬度值均在60HRC左右,硬度高。

表2 力学性能分析结果

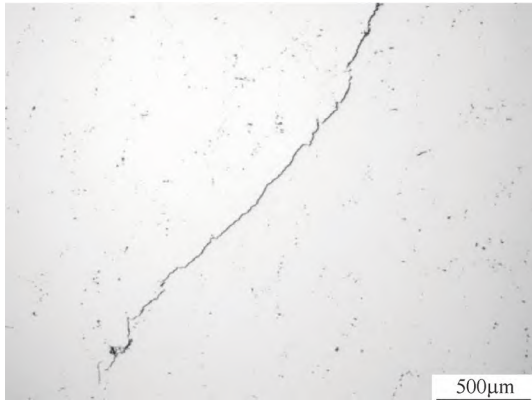
检测项目	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率(%)
检测结果	1194	1049	1.0
技术要求	1000~1200	1000~1200	—

表3 硬度测试结果(HRC)

检测结果	59.5	59.5	60.0
技术要求	58~62		

2.5 金相检验

截取闸板裂纹尾部横向（见图4a）和纵向剖面试样，经镶嵌、磨抛后置于光学显微镜上观察。横向试样和纵向试样中均观察到显微疏松（见图4b、c）。



a) 闸板横向剖面试样抛光态裂纹形貌



b) 闸板横向剖面试样抛光态疏松形貌



c) 闸板纵向剖面试样抛光态疏松形貌

图4 闸板显微组织形貌

纵向试样经化学试剂侵蚀后观察，并按GB/T 14979—1994《钢的共晶碳化物不均匀度评定法》中第四评级图进行评定，试样共晶碳化物不均匀度评为4级，如图5所示。试样显微组织为回火针状马

氏体+共晶碳化物+颗粒状碳化物，如图6所示。

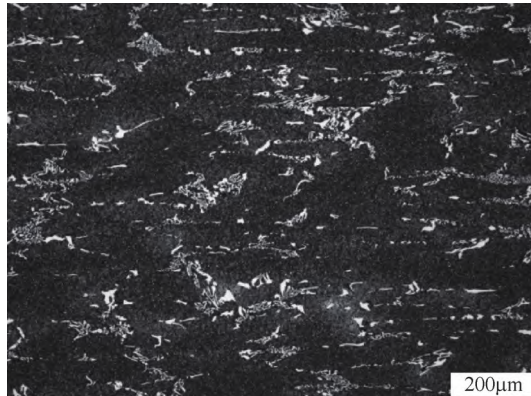


图5 闸板试样共晶碳化物不均匀度

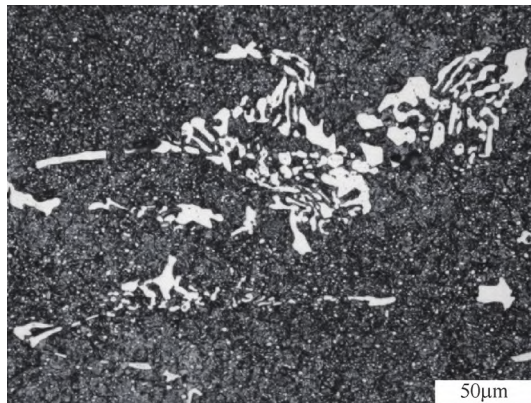


图6 闸板显微组织形貌

截取图3d红框处剖面试样，经镶嵌、磨抛后置于光学显微镜上观察，裂纹源上凹坑剖面形貌如图7所示，将试样再置于扫描电子显微镜下观察，凹坑剖面形貌如图8所示，凹坑呈现为显微疏松特征。



图7 剖面抛光态形貌

2.6 断面SEM形貌

图3d红框处试样经清洗后置于扫描电子显微镜下观察，试样边缘锈斑低倍形貌如图9a所示，可观

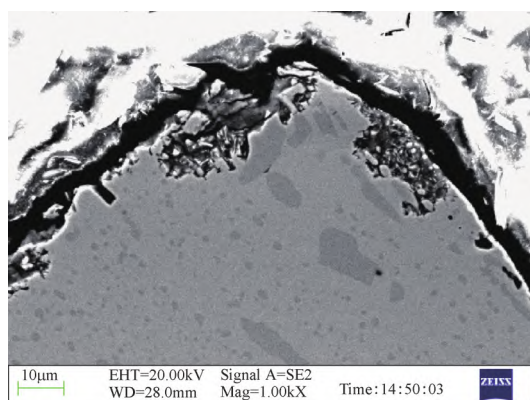
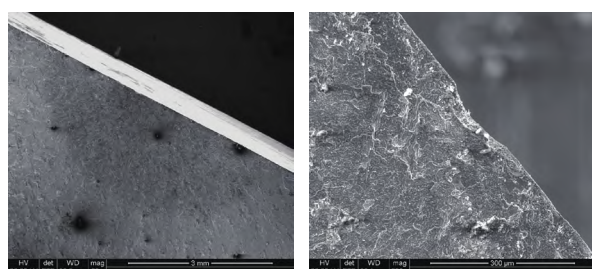


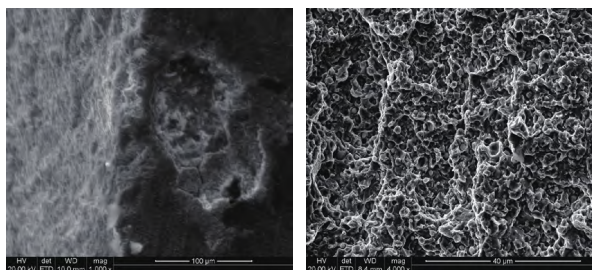
图8 剖面SEM形貌

观察到自损伤处延伸而出的扩展条纹，锈斑边缘观察到凹坑如图9b所示。将试样翻转后观察闸板表面对应图9b位置，闸板表面观察到多处凹坑，如图9c所示，试样其余区域形貌呈现初窝特征如图9d所示。



a) 边缘锈斑

b) 锈斑边缘凹坑



c) 闸板表面凹坑

d) 初窝

图9 断口SEM形貌

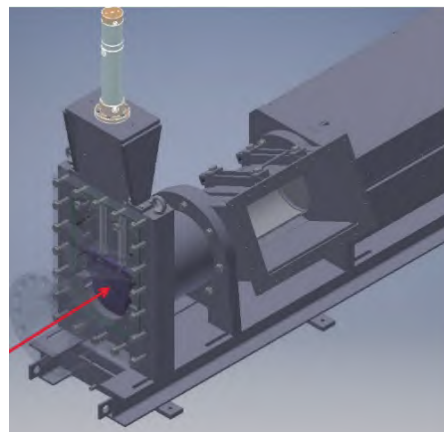
3 闸板受力状态仿真研究

按照固体泵的工作原理进行各个阶段受力分析，研究发现分别在吸料阶段、挤压阶段及闸板关闭阶段受力最大。

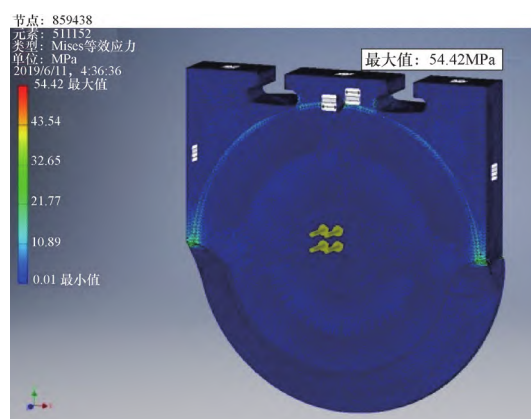
3.1 吸料阶段受力分析

根据固体泵工作原理，当闸板处于关闭阶段时，闸板受到来自泵送管道侧压力作用，依据危险废物管道输送压力监测预警系统得知，该压力的大小为1.1MPa^[12, 13]，如图10a所示。对闸板进行有限元分析得出应力最大值为螺纹处54.42MPa（见图

10b），远小于材料的抗拉强度（1100MPa），但螺纹本身是机械加工应力集中点，在疲劳载荷和外力作用下，螺纹处易发生断裂失效。



a) 吸料阶段受力方向



b) 有限元分析

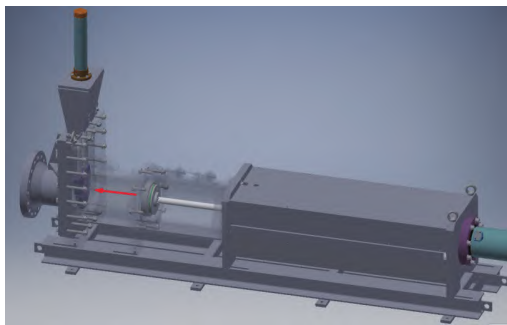
图10 闸板受力分析

3.2 挤压阶段受力分析

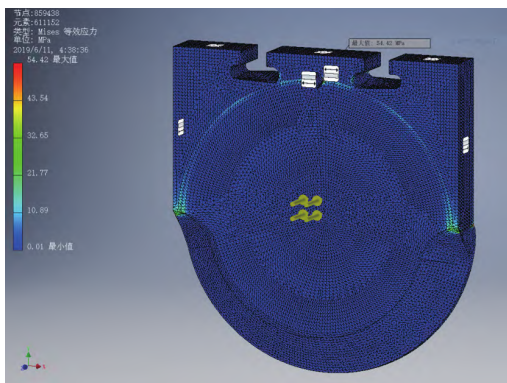
挤压阶段是物料液压缸向前挤压物料，假设泵体内圆筒内物料填充率是100%，则物料液压缸推力将通过危险废物膏体直接传递到闸板上，经过计算，施加到闸板上的压强为8MPa，如图11a所示。在闸板固体泵侧施加载荷，经过有限元分析在圆弧刃处最大应力为357.6MPa，低于材料的抗拉强度，如图11b所示。但此处也是应力集中点，发生断裂易从此处附近开裂。

3.3 闸板关闭阶段

闸板关闭阶段：闸板在液压缸作用下从上向下运动，阻断泵体内圆筒与管道相通。闸板正常损坏时都是闸板下沿处出现豁口，造成物料返流失效。模拟显示在闸板底部有10mm的硬物，造成闸板底部应力集中，经过有限元仿真分析计算得出应力为



a) 挤压阶段受力方向



b) 有限元分析

图11 闸板受力分析

3190MPa, 大于材料的抗拉强度, 如图12所示。上部有螺纹, 下部有硬物, 在共同受力作用下, 将有可能发生与图1a纵向断裂相同的失效形式。当遇到钢筋、铁皮等硬物时, 由于其强度低, 因此闸板会将其切断。

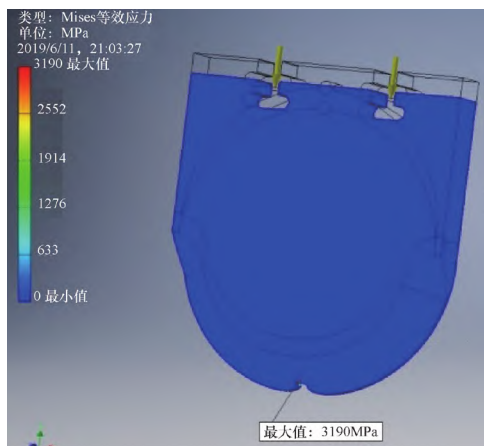


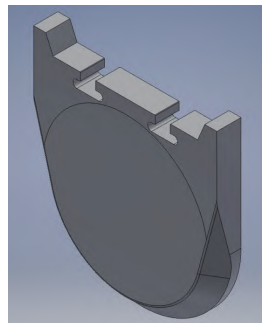
图12 闸板受力分析

4 闸板优化设计

4.1 机械结构优化设计

去除安装与维修使用的吊装用螺纹孔, 避免机械应力集中。切割圆弧上移, 同时上面左右2侧设计

有到位机械限制, 如图13所示。



a) 三维模型



b) 新闸板实物

图13 闸板机械结构优化设计

4.2 热处理优化设计

(1) 去机械加工应力 为了消除机械加工应力及内应力, 在300℃下保温24h, 以消除机械加工应力, 如图14所示。

(2) 深冷 淬火后立即放入液氮深冷炉内, 温度-120℃, 保温4h, 作用如下。

1) 提高工件的强度和硬度。通过低温深冷处理, 金属材料的内部结构会发生变化, 晶粒细化, 从而使其强度和硬度得到提高。

2) 改善工件的韧性。低温深冷处理使金属材料的韧性得到改善, 在深冷状态下, 金属的内部结构发生变化, 位错密度减少, 晶粒细化, 从而提高了材料的韧性。

(3) 多次回火 Cr12Mo1V1冷作模具钢通常要求至少2次回火, 优化后的热处理工艺采用6次回火工序, 多次回火还有助于去除材料中的应力和缺陷, 使碳化物分布更均匀, 减少材料变形的可能性。

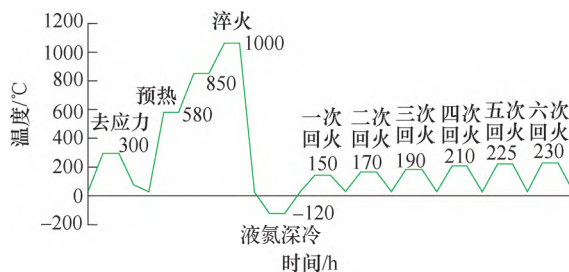


图14 优化后热处理工艺曲线

5 结束语

1) 经过宏观观察, 闸板断口未发现明显塑性变形, 裂纹起始处观察到呈半圆形锈斑, 近锈斑处观察到扩展条纹。锈斑边缘观察到凹坑, 扩展条纹从凹坑处延伸而出, 闸板裂纹断面形貌呈现韧窝特

征。

2) 闸板化学成分、力学性能和硬度均符合技术要求。在闸板的横向和纵向剖面中均观察到显微疏松。闸板的共晶碳化物不均匀度评为4级,显微组织为回火针状马氏体+共晶碳化物+颗粒状碳化物。裂纹源处凹坑呈现显微疏松特征。

3) 闸板中观察到较多细小疏松,削弱了闸板的强度和韧性,从而使闸板在内应力作用下更容易开裂。闸板断裂性质为大应力作用下的一次性开裂。闸板表面的显微疏松形成应力集中点,在较大的残余内应力作用下导致开裂。

4) 依据固体体系的工作原理,对吸料阶段、挤压阶段及闸板关闭阶段采用有限元仿真分析,得出螺旋纹处与圆弧刃处是应力集中点,易发生断裂失效,与工程中闸板断裂失效的3处裂纹相符。对固体泵闸板机械结构进行优化设计,同时采用去机械加工应力、深冷和多次回火工艺优化热处理工艺。

参考文献:

- [1] GUO G M, ZHENG X W, WU M. Dispersion characteristics of the plunger flow hazardous waste by multiple gas jets[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2022, 30 (11) : 1-15.
- [2] 郭光明, 刘惠来, 王宏明, 等. 无轴双螺旋输送机对固体泵容积效率的影响:《环境工程》2019年全国学术年会论文集[C]. 北京:工业建筑杂志社有限公司, 2019: 698-702.
- [3] 郭光明, 郑晓雯, 吴森, 等. 危险废物回转窑焚烧

进料系统:《环境工程》2018年全国学术年会论文集[C]. 北京:工业建筑杂志社有限公司, 2018: 569-573.

- [4] 梁学文, 方均, 郭光明, 等. 阶梯炉在水泥窑协同处置危废中的应用[J]. 水泥, 2022 (5) : 10-13.
- [5] 罗超, 郭光明. 管道输送危险物流变特性测试系统的研制[J]. 起重运输机械, 2019 (6) : 67-70.
- [6] 郭光明, 郑晓雯, PIERRE J C. 管道输送危险废物固体体系的研制[J]. 起重运输机械, 2018 (10) : 101-103, 133.
- [7] 代玉杰. D2钢卡簧冲头断裂失效分析[J]. 热处理技术与装备, 2023, 44 (1) : 40-42.
- [8] 张国强, 徐军. 冷作模具D2钢开裂失效分析[J]. 金属热处理, 2011, 36 (1) : 110-112.
- [9] 侯彩云, 宗铎, 王志忠, 等. Cr12MoV 模具断裂原因分析[J]. 热加工工艺, 2010, 39 (20) : 198-200.
- [10] 贺凯林. Cr12钢模具断裂失效分析[J]. 金属热处理, 2016, 41 (9) : 182-184.
- [11] 赵昌盛. Cr12系钢冷作模具断裂失效分析[J]. 金属热处理, 2003, 28 (1) : 68-69.
- [12] 郭光明, 张艳, 郑晓雯, 等. 危险废物管道输送压力监测预警系统的建立与性能分析[J]. 环境工程, 2019, 37 (6) : 136-140.
- [13] 郭光明, 郑晓雯, 吴森. 管道输送危险废物泵送压力试验研究[J]. 矿业科学学报, 2021, 6 (1) : 82-90.

MW 20241005

《金属加工(热加工)》2024年第12期广告目次

单位名称	查询编号	位置
伊达新技术电源(昆山)有限公司	1925	封面
金属加工杂志征订广告	8000	封二
恒进感应科技(十堰)股份有限公司	1468	封三
易孚迪感应设备(上海)有限公司	1492	封底