

铝锭模具失效分析及对策

陈 心, 王丽阁, 王恩泽

(西南科技大学, 四川绵阳 621000)

摘要: 某企业铝锭模具在使用过程中因表面龟裂、冲刷腐蚀坑和局部大裂纹而报废。通过金相检验、扫描电镜及能谱等手段对模具失效原因进行分析。结果表明: 模具表面存在氧化脱碳现象, 导致屈服强度与硬度下降, 由此形成的热疲劳损伤与金属液冲刷腐蚀是造成模具失效的主要原因。根据失效特征, 给出了相应的对策及措施。

关键词: 氧化脱碳; 金属液冲刷; 热疲劳损伤

2000年以来中国电解铝产业发展迅猛, 目前铝产量和消费量均居世界第一^[1]。随着电解铝产量的提高、工业生产大规模化和技术更新换代的进一步加快, 不仅铝锭模使用量大大增加, 其服役状态也变得更加苛刻^[2]。要求模具具有更加优异的性能, 以保障生产的稳定长效运行^[3-4]。

某电解铝锭生产企业的铝锭模具在使用过程中因表面龟裂、冲刷腐蚀坑和局部大裂纹而报废。本研究通过对该模具材料成分、显微组织与裂纹结构等进行研究, 探讨模具的失效机理, 提出解决对策, 为进一步提高其使用寿命提供理论基础。

1 理化检验

1.1 宏观形貌分析

铝锭模具重25 kg, 壁厚18~22 mm, 经过调质处理, 横截面如图1a所示, 裂纹集中在中部弯角附近。图1b为截取的裂纹样品图, 其中存在一条长约724 mm的贯穿性主裂纹, 主裂纹周围分布多条肉眼可见的微裂纹, 长度约5~50 mm, 裂纹呈锯齿状, 由表面向心部不断扩展, 为典型的应力开裂。

1.2 化学成分分析

本模具采用AISI8630中碳钢, 含铬、镍、钼等合金元素, 经调质处理后具有良好的强韧性。测试样品中心处化学成分如表1所示, 微量的Zn、Al元素对模具的性能影响较小。而Cr元素含量超出标准值的上限, 可增加钢的淬透性, 有利于提高模具的耐磨性和强度。

1.3 微观形貌分析

样品表面经抛光后形貌如图2所示。图2a表明模具表面存在大量冲刷腐蚀坑, 腐蚀坑周围分布有微裂纹, 并成为裂纹源向四周扩展。冲刷腐蚀坑是模具在服役时造成, 冲型浇注时模具表面受到熔融铝液的化学腐蚀与机械作用, 在两种因素的共同作用下造成表面损伤。铝液的温度越高, 冲刷速度越快, 对模具的损伤越大, 该类损伤会显著降低铸件的表面质量, 并在熔融铝液中引入新杂质, 降低铝锭质量。

图2b为模具表面网状热疲劳裂纹区, 裂纹存在氧化现象, 内部充满夹杂物。网状热疲劳裂纹通常形成于模具型腔表面。在生产铝锭的每个周期中, 模具都要在短时间内经历激冷激热的热循环工况与持续不断的拉压应力。随着热疲劳过程的

作者简介:

陈 心(1995-), 男, 硕士, 研究方向为高温涂层的研究与应用。E-mail: 1104334738@qq.com

通讯作者:

王丽阁, 女, 讲师, 博士。E-mail: 4971159@qq.com

中图分类号: TG76

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)07-0769-05

收稿日期:

2020-03-09 收到初稿,
2020-04-23 收到修订稿。

进行,当循环热应力超过材料的屈服强度时,会使模具表层产生往复塑性变形,造成残余应力的积累与损伤,最终导致热疲劳裂纹的萌生与扩展,龟裂形成网状热疲劳裂纹。

1.4 硬度检测

材料的强度对于热疲劳性能起着决定性作用,而材料的强度与其硬度密切相关^[5]。通常情况下材料硬度越高,寿命越高,因为高的屈服强度可以抵抗热循环产生的应力,只要热循环产生的应力不超过材料的屈服强度,模具就不会开裂^[6]。

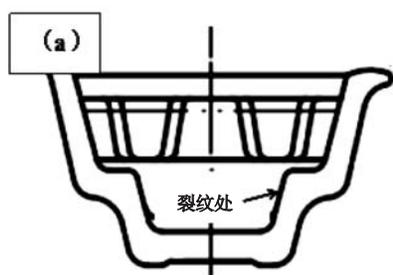
本研究采用维氏硬度计对试样进行硬度检测,在试样截面间隔150 μm 进行多点检测,取其平均值,结果如图3所示。材料表层平均硬度为HV 102.7,距表面150 μm 处硬度急剧上升,达到HV 185.1。随着距离的增加,硬度逐渐上升,600~900 μm 处稳定于HV 230。

试验结果表明铝锭模具在服役过程中,表层硬度大幅下降,降低幅度达55.35%。

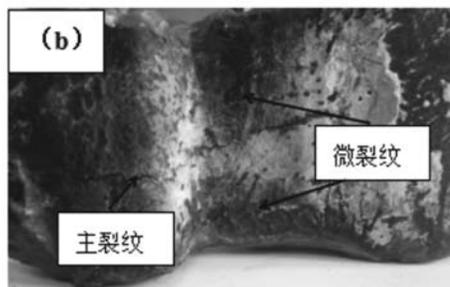
1.5 裂纹夹杂物分析

模具表面存在网状龟裂纹,最大裂纹长度约为0.5 mm,最大宽度约为0.1 mm,裂纹表面被氧化内部充满灰色夹杂物。对铝锭模样品的裂纹夹杂物进行能谱分析(EDS)。如图4所示,灰色的裂纹夹杂主要含有Fe、O元素与微量的Al元素。Fe、O元素的原子比相当,分析应为氧化亚铁;Al元素是熔融铝液渗透到裂纹之中形成的微量铝铁化合物。

裂纹的形成对模具寿命有较大影响。在热应力的作用下,材料表面晶粒内位错急剧增加,驻留滑移带大量形成,微裂纹与孔洞沿着驻留滑移带不断萌生,并逐渐形成热疲劳裂纹。裂纹的生长与组织滑移变形的各向异性密切相关,所以使龟裂纹路以折线的形式



(a) 横截面示意图



(b) 裂纹处宏观形貌

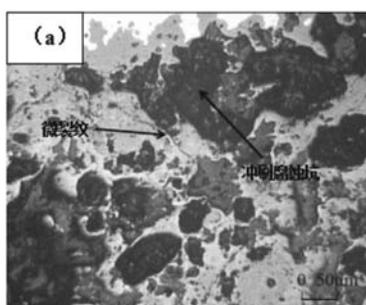
图1 铝锭模具形貌

Fig. 1 Schematic diagram of cross-section of aluminum ingot mold and macro cracks photo

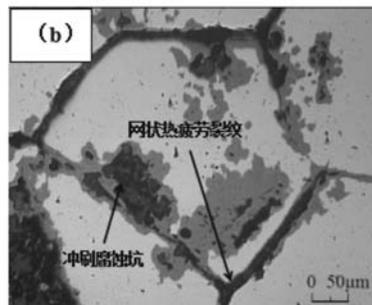
表1 模具的化学成分

Table 1 Chemical composition of aluminum ingot mold

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Zn	Al	$w_B/\%$
要求值	0.2~0.3	0.2~0.35	0.7~0.9	≤ 0.035	≤ 0.035	0.4~0.6	0.4~0.7	0.15~0.25			
实测值	0.21	0.33	0.72	0.02	0.03	0.61	0.57	0.16	0.08	0.08	



(a) 冲刷腐蚀集中部



(b) 热疲劳裂纹集中部

图2 铝锭模具表面形貌图

Fig. 2 Surface morphology of aluminum ingot mold

形成,最终形成网状。当裂纹形成后,裂纹壁通常会在高温下被氧化,生成氧化亚铁夹杂物。由于氧化亚铁夹杂与基底热膨胀系数不同,在高温工作状态下会产生热应力,加剧裂纹的扩展。最先作为裂纹源的裂纹宽度通常较大,且内部氧化物在热应力作用下被破坏出现裂缝与孔洞。裂纹在扩展过程中,尖端不断分枝变细,裂纹尖端在最大切应力方向上从密排面发生滑移,形成微裂纹与孔洞,然后主裂纹以桥接的方式连接这些微裂纹与孔洞,并逐渐生长延长。

1.6 XRD 测试结果及分析

分别对失效铝锭模样品表面、截面进行XRD分析。结果如图5所示,截面与表面都为 α -Fe相峰位,但截面衍射峰存在宽化现象,分析是由于马氏体与铁素体同为体心立方晶体结构,两者衍射峰叠加造成的宽化结果。

1.7 金相组织分析

失效铝锭模具样品金相如图6所示。图6a为模具型腔表面金相,如图所示铝锭模表面严重脱碳,组织由大量铁素体与少量索氏体组成;图6b表明模具正常组织为均匀分布的铁素体与索氏体;图6c为脱碳层金相,图中表明铝锭模表层存在严重脱碳现象,厚度约为100~166 μm ,组织为大块铁素体。铝锭模具钢脱碳主要是由于在接近700 $^{\circ}\text{C}$ 的高温下服役,钢表面的碳原子受热振动时其逸出功增加,脱离金属晶格的束缚的能力变强,同时碳原子与氧原子的亲和力大于碳原子和铁原子的亲和力,因此碳原子发生氧化。经过氧化之后,钢表面碳含量降低,造成与内部碳含量浓度梯度差,碳元素不断向表面扩散,最终导致模具钢氧化脱碳。

脱碳层金相(图6c)表明热疲劳裂纹是从表层硬度较低的铁素体组织逐渐向心部扩展,扩展方式为穿晶扩展。这是由于模具表层脱碳形成的铁素体晶粒韧性较好,晶界强度较高,因此裂纹并不优先在晶界处

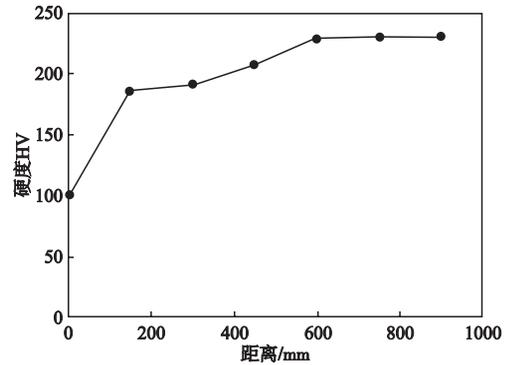


图3 铝锭模截面硬度曲线图

Fig. 3 Hardness curve of cross-section of aluminum ingot mold

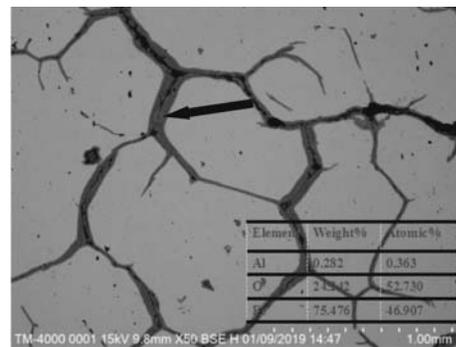


图4 裂纹夹杂物EDS

Fig. 4 EDS of crack inclusion

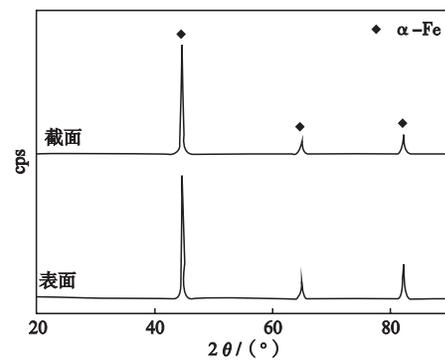
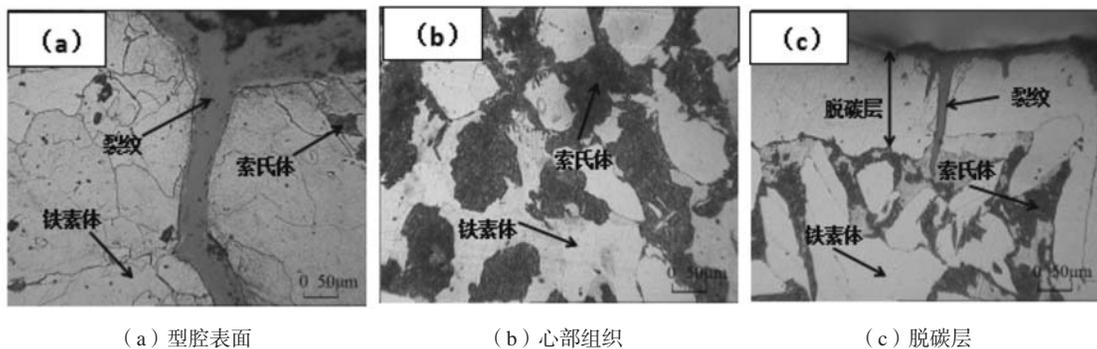


图5 铝锭模XRD对比图

Fig. 5 XRD patterns of cross-section and surface of aluminum ingot mold



(a) 型腔表面

(b) 心部组织

(c) 脱碳层

图6 铝锭模金相腐蚀图

Fig. 6 Metallographic corrosion diagram of aluminum ingot mold

萌生,而是在晶内出现。在高交变应力作用下,铁素体晶粒内部首先发生大量塑性变形,产生交滑移或复杂滑移使晶粒内部产生损伤,导致热疲劳微裂纹的萌生。随着应力循环次数增加,不同晶内微裂纹相互桥接,最终导致热疲劳裂纹的穿晶扩展。

2 失效分析与讨论

模具钢的热疲劳性能主要受材料塑性与强度的综合影响^[7]。模具塑性好,可使材料局部集中的热应力得到松弛,提高热疲劳寿命。但模具同样需要较高的强度,如果强度不足,热循环应力超过材料的屈服极限,便容易萌生热疲劳裂纹。从本试验结果可知,该模具钢氧化脱碳造成表层硬度过低,热作模具钢硬度要求一般在HRC40~55^[8]。本模具表层硬度远低于标准值,因此导致热循环应力易超过材料的屈服极限,使其表面出现大量热疲劳裂纹。热疲劳裂纹在萌生初期,模具仍能继续服役,通过裂纹的萌生,型腔表层的热应力会得到松弛,形成的裂纹一般仅为数毫米,并不会沿纵向扩展。但本研究中的热疲劳裂纹大部分有几十毫米深,甚至主裂纹贯穿了整个模具。这是由于在持续服役中裂纹会被不断氧化腐蚀,以及受到铸锭的摩擦、挤入所产生的机械应力,使裂纹继续向纵深扩展,模具的承载能力因此大幅度下降,当裂纹尺寸达到某临界值后,最终导致开裂。

本试验中铝锭模具表面存在的氧化脱碳与硬度降低现象,除导致热疲劳裂纹易于萌生,还加剧了模具的冲刷腐蚀程度,冲刷腐蚀坑的形成,不仅降低铸件表面质量,同时成为热疲劳裂纹的萌生源,加剧裂纹萌生与扩展。

3 提高使用寿命的对策

3.1 对模具进行表面改性处理

本模具钢表面存在氧化脱碳现象,使表层硬度与热疲劳性能下降,由此形成的热疲劳损伤与金属液冲刷腐蚀是造成模具失效的主要原因。利用表面改性可在模具表层施加覆盖层或改变材料表面形貌、组成、成分及应力状态等,来提高模具使用寿命。研究表明利用表面改性技术在模具表面制备涂层,能有效阻隔

熔融铝液与型腔的直接接触,形成保护膜,阻挡碳、氧的互扩散,显著降低模具的氧化与脱碳问题。模具表面涂覆涂层之后,涂层受热时的膨胀收缩能够缓解铝锭在铸造过程受到的热应力,延迟热疲劳裂纹的产生。并且涂层在使用过程中还可防止液态铝液的直接侵蚀,缓和激热作用,降低模具表面能,使液态铝液和模具之间的粘结力降低从而易于脱模。有研究表明,利用PVD技术在压铸模芯棒制备陶瓷涂层,其寿命提高了3~8倍^[9]。

3.2 模具材质替换

AISI8630钢是性能良好的中碳钢,作为浇注铝锭模具钢使用是否为最佳选择,有待进一步研究。若想从合金材质方面进一步改善,可参考H13、4Cr3Mo2NiVNb等型号模具钢。H13钢是应用广泛的热作模具钢,主要含Cr、Mo、V等合金元素。与高韧性热作模具钢5CrNiMo、5CrMnMo相比,H13钢具有更高的热强性、热稳定性和淬透性。与高热强性热作模具钢3Cr2W8V钢相比,使用寿命也高于3Cr2W8V钢2~3倍^[10-11]。4Cr3Mo2NiVNb钢是为适应700℃左右工作而研制的新型高耐热性钢。在硬度相同的情况下,4Cr3Mo2NiVNb钢比3Cr2W8V钢的断裂韧度高50%,700℃时抗拉强度高70%,热疲劳抗力和热磨损性能分别高出1倍和5%,用其制作的热挤压模使用寿命也高于3Cr2W8V钢2~10倍^[12]。

4 结论

(1) 在高温服役条件下铝锭模具表面存在严重的氧化脱碳现象,导致屈服强度与硬度下降,由此形成的热疲劳损伤与金属液冲刷腐蚀是造成模具失效的主要原因。

(2) 利用表面改性在模具表面制备涂层可有效减少氧化脱碳问题,防止铝液侵蚀,缓和激热现象,提高模具寿命。

(3) AISI8630钢是性能良好的中碳钢,作为浇注铝锭模具钢使用是否为最佳选择,有待进一步研究。若想从合金材质方面进一步改善,可参考H13、5Cr4Mo3SiMnVAI等型号模具钢。

参考文献:

- [1] 刘佳利,杨华伟.供给侧改革下我国电解铝产业发展的新格局[J].冶金经济与管理,2018(1):36-42.
- [2] 杨远平,张榜英.浇注速度及浇口位置对大型铝锭模应力场的影响[J].铸造,2012,61(3):291-295.
- [3] BALA Y G, SANKARANARAYANAN S R, PANDEY K S. Assessment of densification and mechanical property of AISI 8630 steel composition on different heat treatments produced through hot upsetting powder preform forging[J]. Metals & Materials International, 2015, 21(6):1044-1053.
- [4] 汪煦,赵玉涛,苏大为,等.ProCAST在金属型重力铸造充型和模具温度场中的应用[J].铸造,2008,57(12):1263-1266.

- [5] LIA, WANG W, WANG X, et al. Fatigue and brittle fracture of carbon steel process pipeline [J]. Engineering Failure Analysis, 2005, 12 (4): 527-536.
- [6] 陈莉, 赵宇. 陶瓷型精密铸造模具表面脱碳的解决措施 [J]. 铸造, 2007 (3): 306-308.
- [7] 张露, 邓凌曲. 铝合金压铸模具龟裂失效分析 [J]. 金属加工 (热加工), 2014, 1 (S2): 162-163.
- [8] 陈再枝, 蓝德年. 模具钢手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [9] BIROL Y. Thermal fatigue testing of duplex-coated hot work tool steels at elevated temperatures [C]//American Institute of Physics Conference Series, 2011.
- [10] 徐继罗, 孙守田, 钱海峰. H13热作模具钢开裂失效问题分析 [J]. 锻造与冲压, 2020 (1): 58-60.
- [11] 宋锐. 3Cr2W8V热作模具钢高温磨损行为的研究 [D]. 江苏: 江苏大学, 2009.
- [12] 孟超. 材料、形状耦元、热循环温度对热作模具热疲劳性能的影响 [D]. 吉林: 吉林大学, 2014.

Failure Analysis and Countermeasure of Aluminum Ingot Mold

CHEN Xin, WANG Li-ge, WANG En-ze

(Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, Sichuan, China)

Abstract:

The aluminum ingot mold used in certain enterprise was scrapped due to surface cracks, erosion corrosion pits and local large cracks. The causes of damage were analyzed via metallographic examination, scanning electron microscopy and energy spectrum analysis. The results show that there is oxidative decarburization on the surface of the mold, resulting in a decrease in yield strength and hardness. The resulting thermal fatigue damage and metal liquid erosion corrosion are the main causes of mold failure. According to its failure characteristics, the corresponding countermeasures are given.

Key words:

oxidative decarburization; metal scouring; thermal fatigue damage
