

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2021.06.003

## 液态模锻 2A50 特种车辆轮盘冷隔 缺陷的成因与防治

刘 鑫<sup>1,2</sup>, 邢书明<sup>1</sup>, 武 彤<sup>1</sup>, 王永生<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044; 2. 北方车辆集团有限公司, 北京 100072)

**摘要:**对液态模锻 2A50 铝合金负重轮轮盘的冷隔产生进行了分析, 表明其起源于轮缘周表面晶界处, 并且向内部扩展。冷隔产生的主要原因是铝液紊乱, 波动至下模外套直壁上, 下压过程中, 铝液难以冲破这层表面层, 于是形成冷隔。通过缓冲滤渣漏斗工装、适当调节导流槽铝液流速、增加捞渣工序等措施, 减少了铝液表面氧化膜的数量, 使铝液平稳填充, 杜绝铝液波动, 从而消除冷隔的产生。

**关键词:**2A50 铝合金; 液态模锻; 负重轮; 冷隔

**中图分类号:**TG 316.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**2095-0411(2021)06-0017-05

## Causes and Prevention of Cold Shut Defects in 2A50 Special Vehicle Wheels Produced by Molten Metal Die Forging (MMDF) Process

LIU Xin<sup>1,2</sup>, XING Shuming<sup>1</sup>, WU Tong<sup>1</sup>, WANG Yongsheng<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Northern Vehicle Group Co., Ltd., Beijing 100072, China)

**Abstract:** The causes of cold shut of 2A50 aluminum alloy wheel hub produced by the molten metal die forging process, MMDF for short, were analyzed. The result shows that the cold shut originates from the grain boundary of the wheel flange surface and extends to the inside. The main reason for forming the cold shut is that the aluminum liquid fluctuates to the lower mold wall due to disorder. During the pressing process, it is difficult for the aluminum liquid to break through this surface layer, and thus a cold shut is formed. By buffering the filter residue funnel tooling, appropriately adjusting the flow rate of the aluminum liquid in the diversion tank, and increasing the oxides removal process, the number of oxide films on the surface of the aluminum liquid is reduced, the aluminum liquid is filled smoothly and its fluctuation is eradicated, and thus the generation of cold shut is eliminated.

**Key words:** 2A50 aluminum alloy; liquid die forging; loading wheel; cold shut

**收稿日期:**2021-06-14。

**作者简介:**刘鑫(1989—), 男, 北京人, 博士, 工程师。通信联系人: 邢书明(1962—), E-mail: smxing@bjtu.edu.cn

**引用本文:**刘鑫, 邢书明, 武彤, 等. 液态模锻 2A50 特种车辆轮盘冷隔缺陷的成因与防治[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2021, 33(6): 17-21.

液态模锻是一种优质、高效的先进工艺方法,是介于铸造和模锻之间的金属成形工艺,其性能接近于同种合金的锻造水平<sup>[1-3]</sup>,通过对处于液态的金属材料施加高压而流变与凝固成形,因此具有铸造工艺简单、制件形状复杂、生产成本低等优点,可制造出近净成型的产品,在汽车、电子通讯、特种车辆、冶金矿山等行业得到广泛应用<sup>[4-5]</sup>。

2A50 铝合金属于 Al-Cu-Mg-Si-Mn 系铝合金,Cu 为该合金的主要强化元素,具有良好的工艺性能和力学性能<sup>[6-8]</sup>,是多种零部件的重要材料,如导弹舱盖、齿轮、活塞、壳体等<sup>[9-11]</sup>,也是特种车辆行走部零件——负重轮的关键材料。在中国,采用液态模锻工艺生产 2A50 铝合金负重轮已有十几年的时间,生产数量和质量稳步提升。但是,国内液态模锻工艺生产的 2A50 铝合金负重轮在性能稳定性上波动较大,而且轮盘的直臂需要挂胶后才可使用,因此国内在轮盘直臂位置的研究较少,尤其是在直壁部位冷隔探究上一直是个空白。本文针对轮盘直臂的缺陷开展了相关研究,提出相应的解决措施,为控制和杜绝冷隔的产生奠定一定的基础。

## 1 液态模锻 2A50 铝合金轮盘冷隔分析

某批次 2A50 铝合金轮盘液态模锻成形件在着色探伤的过程中,发现局部出现红色渗透线,如图 1 所示,表明该部位产生线性缺陷,探伤线性缺陷长度约为 200 mm。进一步通过 X 射线探伤(图 2),确认该缺陷部位为冷隔裂纹缺陷。

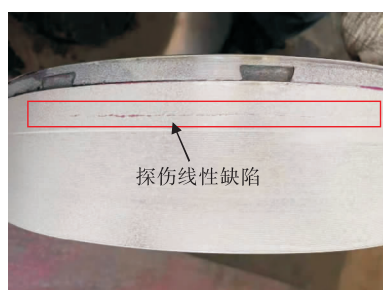


图 1 着色探伤

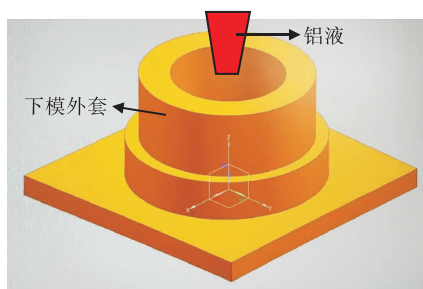
Fig.1 Color flaw detection



图 2 X 射线探伤

Fig.2 X-ray inspection

对该批 2A50 铝合金轮盘液态模锻成形件取样进行解剖分析(图 3(a)),发现裂纹是沿轮缘外表面向内部扩展,冷隔裂纹长度为 10~15 mm,如图 3(b)所示,冷隔出现的区域主要是轮缘直壁下部和直壁与底部转角处。产生冷隔的原因主要为铝液在模具内充填过程中的紊乱所致,在充填过程中,由于流速过快且不平稳,当铝液晃动至下模外套的直臂位置时,后续又无铝液补充,这时铝液会在下模外套的直臂位置上瞬间凝固,造成在图 1 红线区域处出现隔层,从而出现冷隔。



(a) 铝液浇注模具示意图



(b) 冷隔裂纹图

图 3 铝液浇注模具示意图及冷隔裂纹图

Fig.3 Schematic diagram of molten aluminum pouring molds and cold barrier crack diagram

进一步对冷隔进行了 SEM 形貌分析。由于冷隔尺寸属于宏观范围,因此在 SEM 下分析了冷隔的源头(图 4(a))、中部(图 4(b))和末端(图 4(c))。由图中可以看出,冷隔的源头起源于晶界处,穿越晶粒而过。冷隔中白色化合物经过 EDS 能谱分析,如图 5 所示,含有 Al, Cu 等元素。

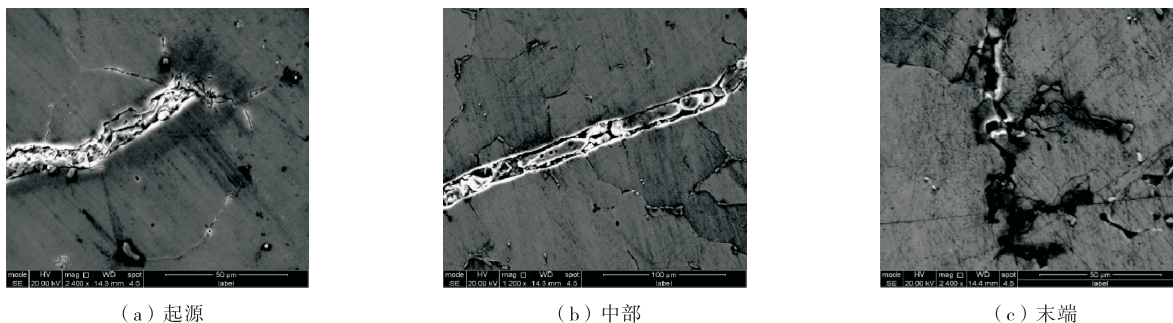


图 4 冷隔 SEM 形貌图

Fig.4 SEM morphology of cold shuts

冷隔的中部形貌与源头类似,宽度在  $8 \sim 10 \mu\text{m}$ 。同样其内部的白色化合物经过 EDS 能谱分析含有 Al, Cu 等元素,可能为氧化铝中混杂有铝合金。冷隔的末端为微裂纹,沿着金属间化合物扩展。经过分析,金属间化合物为 Al-Cu 相。可以看出,冷隔会诱导微裂纹的产生。

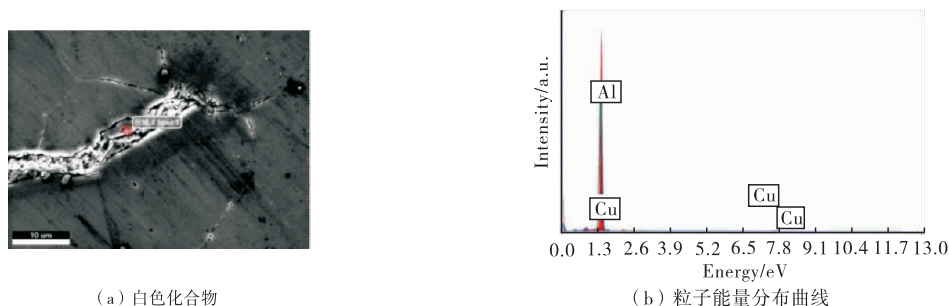


图 5 白色化合物 EDS 能谱图

Fig.5 Energy dispersive spectrum diagram of white compound

## 2 2A50 铝合金轮盘液态模锻过程冷隔产生机理

制备负重轮轮盘的主要方法是将熔融状态的 2A50 铝合金,通过导流槽定量浇注于模具之中,再经过较大的压力压制成型。铝液在液态模锻过程中实为一个动态的过程,主要有 3 个阶段。

1) 浇注过程(图 6)。铝液通过导流槽浇注于下模具中心,由于流槽于模具间的高度差以及铝液的射流速度,导致流入模具内的铝液存在一定的动量,使浇注于模具内的铝液紊乱,易发生飞溅,此时铝液若飞溅到下模外套直臂上,将瞬间凝固,发生冷隔;在铝液浇注一定量到浇注完成期间,由于铝液的紊乱,铝液会从下模中心向下模壁流动,将使模具内铝液水平面发生波动,此时铝液面将晃动至下模直臂上,易在下模壁位置形成氧化铝膜,发生冷隔<sup>[12]</sup>。

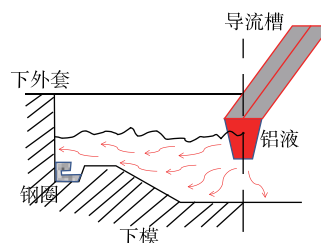


图 6 铝液浇注过程示意图

Fig.6 Schematic diagram of liquid casting process of aluminum alloy

2) 浇注完成后捞渣。由于铝液与下模具底部的高度差,在铝液浇注过程中会产生大量气泡和大量

的氧化膜,需要及时捞出,但铝液填充是混乱无序的,氧化膜遍布于模具内铝液的整个水平面,此时捞渣极易使铝液晃动至下模直臂上,从而易发生冷隔。

3)合模后。模具内铝液动态,如图 7(a)所示。由于铝液极易氧化,当浇注完成捞渣后,模具内铝液表面瞬间形成一层氧化薄膜,压头下压接触铝液后,在铝液表面形成一层凝固壳,当压头继续下压时,模具内铝液表面的氧化膜和凝固壳被破坏,随着压力增大,压头下行,与压头接触的铝液表层将会被挤向下模外套方向。若一开始捞渣不彻底,离下模外套直臂近的氧化膜将易被挤压至下模外套直臂上,与后续补充的铝液形成分层,导致在下模外套直臂上发生冷隔,终在轮盘直臂探伤后发现线性缺陷。这种由氧化膜被挤到下模外套直臂所产生的冷隔裂纹缺陷较短,一般在 5~15 mm,如图 7(b)所示,此线性缺陷长度约为 8 mm。

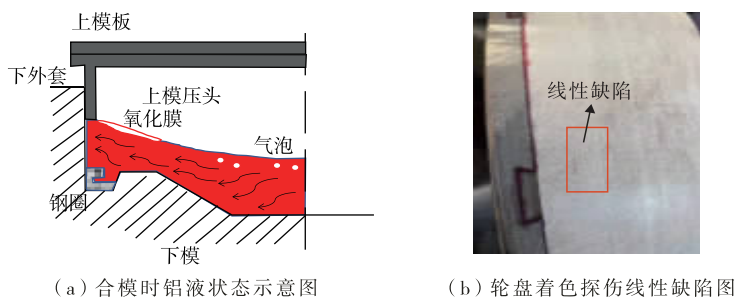


图 7 合模时铝液状态示意图及轮盘着色探伤线性缺陷图

Fig.7 Schematic diagram of liquid aluminum state during die closing and linear defect diagram of color flow detection of wheels

### 3 解决方案

液态模锻轮盘压制后产品轮缘方向产生冷隔的主要原因是下模外套壁部位的氧化铝膜较多,与凝固壳层一起形成较厚的表面层,黏附于下模壁。下压过程中,铝液难以冲破这层表面层,于是形成冷隔。为了解决浇铸过程中铝液面氧化铝膜多的问题,主要通过 3 种方式来解决。

1)在铝液流速变化的情况下,下模中的铝液水平面会不断被扰动、冲刷,甚至形成卷流。若铝液在模具内产生晃动,氧化铝膜将瞬间黏附于下模外套壁上,易形成缺陷。采用两步来控制,一是设计缓冲滤渣漏斗工装来控制液流,如图 8(a)所示,一方面漏斗过滤氧化铝渣,使产生的氧化膜聚集于中心便于捞渣,另一方面漏斗起到缓冲作用,杜绝了铝液在模具内的波动。二是要求在接铝液时漏斗不动,浇注于模具正中央并控制铝液不飞溅于耐磨圈上,如图 8(b)所示,让铝液缓慢地在下模中上升,降低铝液紊乱程度,杜绝液面晃动至下外套直臂上。



(a) 缓冲滤渣漏斗

(b) 漏斗过滤铝液

图 8 缓冲滤渣漏斗过滤铝液

Fig.8 Buffer filter residue funnel to filter aluminum liquid

2)适当调节定量机中铝液的射流流速,并尽量缩短浇注时间。若浇注时间过长,模具内铝液易凝固,导致产品无法成型;调节定量浇注机的射流速度,使流速须固定为同一速度,避免由于速度的变化导致铝液在模具内的晃动提前冲击于下模外套的直壁上,也同时避免由于流速过快导致铝液从缓冲漏斗

工装内溢出,导致飞溅在下模外套的直臂上。

3)增加捞渣工序。在铝液浇注完成后,采用自主设计的捞渣工装,快速捞净模具中心铝液表面的氧化铝膜,减少模具内氧化铝膜的残留。

通过以上 3 种方式对轮盘生产进行改进,负重轮轮盘的着色探伤合格率从 81.2%提高至 100%,见表 1。通过表 1 可知,采用此 3 种方式控制,可以避免轮盘直臂位置冷隔的发生,保障了负重轮轮盘产品质量的可靠性。

表 1 某型号负重轮轮盘改进前后探伤合格对比

Table 1 Comparison of flow detection of a certain type of load wheel disc before and after improvement				
探伤序号	日期	轮盘探伤件数/件	探伤合格数/件	探伤合格率/%
改进前 A	2019-06-12—2020-03-27	780	638	81.2
改进后 B	2020-04-07—2020-12-16	936	936	100

4 结 论

1)2A50 铝合金轮盘的冷隔产生于浇注过程中铝液的波动至下模外套直臂上,以及在捞渣过程中铝液的大面积波动和在合模时靠近外套的氧化膜被挤到下外套直臂上。

2)2A50 铝合金轮盘冷隔的形成机理主要是模具内铝液的紊乱,使铝液在下外套直臂上的瞬间凝固,产生分层,在下压过程中铝液难以冲破凝固壳,从而在产品轮缘方向产生冷隔裂纹。

3)通过缓冲滤渣漏斗工装、适当调节导流槽铝液流速、加强聚渣等措施,减少了氧化渣的形成,杜绝了铝液在模具内的波动,从而消除了冷隔的产生。

参考文献:

[1]罗守靖,何绍元,王尔德,等. 钢质液态模锻[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1990.

[2]李顺,李宏伟,张新,等. 高性能铝合金结构件液态模锻技术研究[J]. 新技术新工艺,2015(6): 129-134.

[3]王长顺,李宏伟,陈利华,等. 特种车辆新型高强韧铝合金负重轮液态模锻工艺成型研究[J]. 新技术新工艺,2013(7): 88-90.

[4]赵恒义,周天西,袁燕. 液态模锻工艺及发展应用现状[J]. 热加工工艺,2000,29(2): 45-46,57.

[5]洪慎章,曾振鹏. 铝合金零件半固态模锻的应用及发展[J]. 锻压技术,2004,29(4): 5-7.

[6]MURALI S,YONG M S. Liquid forging of thin Al-Si structures[J]. Journal of Materials Processing Technology,2010,210(10): 1276-1281.

[7]YIN F,WANG G X,HONG S Z, et al. Technological study of liquid die forging for the aluminum alloy connecting rod of an air compressor[J]. Journal of Materials Processing Technology,2003,139(1/2/3): 462-464.

[8]LUO S J, HE S Y, MA S M. The optimum selection of technological parameters for liquid forging of pumic-aluminum composite materials[J]. Journal of Materials Processing Technology,1993,39(1/2): 145-151.

[9]胡茂良,赵密,吉泽升,等. 汽车空调器摇盘挤压铸造模具设计及工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金,2005,25(3): 155-157,126.

[10]邢书明,闫光远,鲍培玮,等. 挤压铸造高品质大型结构件[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(2): 133-138.

[11]ZHAO Z, CHEN Q, HU C K, et al. Near-liquidus forging, partial remelting and thixoforging of an AZ91D + Y magnesium alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds,2009,485(1/2): 627-636.

[12]刘六法,张彩平,翟春泉. 铝合金挤压铸件典型缺陷的预防和控制[J]. 特种铸造及有色合金,2008,28(6): 442-444,407.

(责任编辑:李艳,周安迪)