

喷丸对低压铸造 A356 铝合金转向节组织与性能影响

高文杰 杨弋涛
(上海大学材料科学与工程学院)

摘 要 在低压铸造 A365 铸造铝合金转向节过程中引入局部表面喷丸强化工艺,测试并分析表层残余应力分布情况及加热温度对其影响、表层显微硬度并观察喷丸截面的金相组织。结果表明,通过喷丸处理可使表层组织中的共晶 Si 细化并显著提高铝合金的表层硬度。喷丸时间为 0~30 min 时,随喷丸时间延长铝合金表层硬度逐渐增大,喷丸 30 min 时表层硬度(HV)约为 230,与合金心部相比提高了约 1.35 倍。由于喷丸效果在超过 100 ℃时会消失,因此喷丸处理后的铸件工作温度建议不超过 100 ℃。

关键词 A356 铝合金;喷丸处理;显微硬度;热处理

中图分类号 TG249.2;TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.10.022 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Effects of Partial Shot Peening on Microstructure and Properties of Low Pressure Casting A356 Aluminum Alloy Steering Knuckle

Gao Wenjie, Yang Yitao
(School of Materials Science and Engineering, Shanghai University)

Abstract: The partial surface shot peening process was introduced to the low pressure casting A365 aluminum alloy steering knuckle. The effects of distribution of surface residual stress and the heat temperature on the alloy as well as the microhardness were tested and analyzed. The cross-section microstructure of the shot peening section was observed. The results indicate that the eutectic Si grains in the surface microstructure is refined and the surface hardness of aluminum alloy is improved significantly by shot peening. In the range of 0~30 min, the hardness of the aluminum alloy surface is increased gradually with the extension of the shot peening time. When the shot peening time is 30 min, the surface hardness is about 230 HV, which is about 1.35 times higher than that of the center material. Considering that the shot peening effect disappears over 100 ℃, it is not recommended that the working temperature of the casting after shot peening exceed 100 ℃.

Key Words: A365 Aluminum Alloy, Shot Peening Treatment, Microhardness, Heat Treatment

喷丸处理是将高速弹丸流喷射到零件表面,使零件表层发生塑性变形,从而形成具有较高残余压应力的强化层,当零件承受载荷时由于压应力的存在可以抵消一部分应力,从而提高零件的疲劳强度。其被广泛应用于提高长期服役于高应力工况下的金属零件,如飞机引擎压缩机叶片、机身结构件、汽车传动系统零件等^[1]。A356 铝合金具有强度高、密度小的特点,能够有效地减轻汽车自重,是实现汽车轻量化发展的重要材料之一^[2]。

疲劳断裂是 A356 合金制作零件的主要失效形式之一。关于喷丸强化对材料疲劳性能的影响等方面研究者做了大量的研究。ZHAN K 等^[3]、ALI A 等^[4]研究了喷丸对材料表面特性的影响,证实喷丸处理能够明显改善材料的显微组织及残余应力,提高材料的疲劳强度。CHO K T 等^[5]对喷丸处理铝合金表面的硬化机理进行了试验研究,发现喷丸处理能显著提高铝合金的表面硬度。RODOPOULOS C A 等^[6]研究了喷丸工艺对铝合金高、低周疲劳寿命及裂纹扩展速率的影响,并使疲劳性能达到最优。荣祖兰^[7]研究了喷丸处理对试样表面粗糙度与应力分布情况的影响,评估了试样在低循环应力下高周疲劳寿命的增益效果,并认为对高强铝合金试样进行表面喷丸强化处理可以引入表层高应力峰值、大深度的残余压应力,这对改善构件疲劳寿命非常有利。陈超等^[8]对经过高能喷丸处理后的 7A52 铝

收稿日期:2021-03-15;修改稿收到日期:2021-04-16

第一作者简介:高文杰,男,1998 年出生,硕士研究生,上海(200444),E-mail:1347853126@qq.com

通信作者:杨弋涛,男,1964 年出生,教授,上海(200444),E-mail:yangyitao@shu.edu.cn

引用格式:高文杰,杨弋涛. 喷丸对低压铸造 A356 铝合金转向节组织与性能影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(10):1 295-1 330.

GAO W J, YANG Y T. Effects of partial shot peening on microstructure and properties of low pressure casting A356 aluminum alloy steering knuckle[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(10):1 295-1 330.

合金表面进行了纳米化机理分析,发现 7A52 铝合金表面纳米级晶粒的形成机理主要是由于晶粒变形使晶内逐渐形成高浓度位错,位错的缠绕、塞积对基体晶粒进行了初步分割细化,在往复载荷的作用下最终在表面形成了等轴的随机取向分布的纳米级晶粒。本试验对 A356 铝合金转向节铸件进行局部喷丸强化,探讨不同喷丸时间和零件使用温度对铸件金相组织和力学性能的影响,分析表层残余应力的分布情况、显微硬度以及观察喷丸截面金相组织,掌握 A356 铝合金铸件在组织和力学性能上的变化,为喷丸工艺在提升铝合金铸件疲劳性能方面的合理应用提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验对象为 A356 铝合金转向节(见图 1),通过光谱分析得到其化学成分(质量分数,下同)为:7.0% 的 Si,0.35% 的 Mg,0.02% 的 Fe,0.053% 的 Ti,0.28% 的 Mn,余量为 Al。采用低压铸造成形,T6 处理。试样表层残余应力测量位置见图 1。

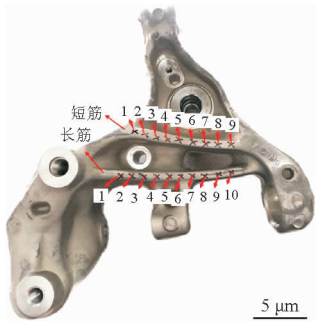


图 1 转向节铸件残余应力测量点具体位置

Fig.1 Specific location of residual stress measurement points in steering knuckle

1.2 试验方法及过程

对 A356 铸造铝合金转向节的两条加强筋(分别称为“长筋”和“短筋”)进行表面喷丸处理,根据经验,取喷丸时间为 30 min,使用 X-350A 型 X 射线应力测定仪测定试样喷丸前后表层残余应力。测试精度为 ± 10 MPa,Cr K α 靶,衍射晶面为 (222)。为减少试验误差,试样在喷丸前后测量应力状态时放置位置应完全相同。

使用 X-350A 型 X 射线应力测定仪对两个已喷丸强化的转向节进行应力测定,测定完成后将铸件 1 在 150 ℃ 下保温 1 h,铸件 2 在 100 ℃ 下保温 1 h,加热处理后空冷。铸件冷却后再次对其表面进行残余应力测定(测定位置与初始测量位置相同)。测量完成后比较两种状态下试样表面残余应力的变化。

应力测量完毕后将转向节铸件中的两条加强筋单

独截取并切割成试样以便于显微硬度测试,使用设备为维氏显微硬度计,对喷丸处理前后的铝合金表面及沿深度方向进行显微硬度测量,每个位置测量 3 次取其平均值,试验载荷为 1.47 N,加载时间为 15 s。

为了解喷丸时间对组织和性能的影响,分别取喷丸时间为 0、5、10、15、20 min 试样的纵切面用砂纸依次打磨,将试样磨至最小粒度后抛光,待纵切面抛光至镜面后使用体积分数为 5% 的 HF 酒精溶液腐蚀,用 Nikon-MA100 型金相显微镜观察从表面随深度变化的组织分布,对表面及沿深度方向进行显微硬度测量,并观察试样纵切面从表层至深度的显微硬度。

2 试验结果与分析

2.1 喷丸处理对表层残余应力的影响

表 1 为喷丸处理前后铸件加强筋表面的残余应力。可以看出,在喷丸处理前试样表面处于应力正负交错状态,即拉应力和压应力交错状态,有拉应力存在处可能成为潜在裂纹源,容易引起铸件表面裂纹的形成,不利于铸件的疲劳性能。而经过喷丸处理,在试样表面形成了较大的残余压应力,由喷丸引入的残余压应力通过削弱外加交变正应力中最大值,使铸件表面实际承受的平均应力值下降,从而达到提高疲劳性能的效果^[9]。另外,残余压应力的增大还能够增强合金铸件刚度,提高合金铸件的表面强度,也有助于延长其疲劳寿命。

表 1 铸件加强筋表面残余应力

Tab.1 Residual stress on the surface of stiffeners MPa				
位置	喷丸处理前		喷丸处理后	
	长筋	短筋	长筋	短筋
1	-33	-31	-80	-46
2	-13	17	-74	-68
3	-47	32	-141	-69
4	13	48	-134	-61
5	-25	-54	-220	—
6	3	-4	-113	—
7	—	-61	-158	—

2.2 环境模拟加热温度对喷丸层残余应力的影响

不同状态下两个铸件的应力测定情况见表 2。可以看出,由于在进行加热之前对试样表面进行了喷丸处理,长、短筋表层普遍存在压应力状态,而经过加热之后喷丸处理所带来的压应力状态明显消退。这是由于温度升高使试样表层应力状态恢复为原始的拉应力状态或拉压应力交替存在状态,拉应力的存在会降低表层试样的强度和塑性,从而不利于试样的疲劳性能^[10]。为此喷丸后铸件推荐在室温或长时间受热温度不高(建议低于 100 ℃)的环境下使用较为合适,这样有利于保持铸件局部的喷丸强化效果。

表 2 两个铸件热处理前后的残余应力值

Tab.2 Residual stress values of different castings before and after heating treatment

铸件 1				铸件 2			
长筋		短筋		长筋		短筋	
喷丸状态	150 ℃ 加热态	喷丸状态	150 ℃ 加热态	喷丸状态	100 ℃ 加热态	喷丸状态	100 ℃ 加热态
-96	-11	-50	37	-134	39	-78	47
-107	-42	-73	11	-210	35	-90	66
-100	-53	-75	3	-248	21	-118	53
-99	-53	-38	14	-168	8	-42	36
-94	-46	-40	25	-76	4	-62	33
-88	-21	-33	5	-126	-1	-35	23
-56	3	-164	12	-53	-13	—	—
-74	-26	-151	15	-49	-12	—	—
-45	-3	-230	-11	-64	-35	—	—
-37	-32	—	—	—	—	—	—

2.3 喷丸处理对表层截面组织及硬度的影响

表 3 为喷丸前后试样表层的显微硬度。可以看出，试样显微硬度在喷丸后显著提高，这是因为试样表层经高能喷丸处理后形成了具有一定厚度的塑性变形层，并且在此变形层厚度范围内试样由表层随深度增加，其晶粒尺寸呈现由小到大梯度分布的趋势，最表层晶粒预计将显著细化，这主要是因为随着距表面距离的增加，塑性变形更加强烈，位错缠绕、塞积逐渐形成规则的位错胞。随着冲击作用的不断增强，以上过程在铝合金表层变形区域反复进行，使得晶粒不断细化，从而使表面硬度能够得到明显改善^[11]。同时由于合金表层的塑性形变，致使表层晶粒产生滑移，增加了亚晶粒内位错密度（即表层晶粒的形状和位置发生了变化），也有利于表面硬度的提高。这有助于工件的疲劳强度、抗冲击磨损及抗应力腐蚀等性能的提高。

表 3 喷丸前后试样显微硬度 (HV)

Tab.3 Microhardness of specimens before and after shot peening

喷丸前	喷丸后
146.7	215.5
131.1	217.1
161.7	230.6
180.6	210.4
183.5	205.9

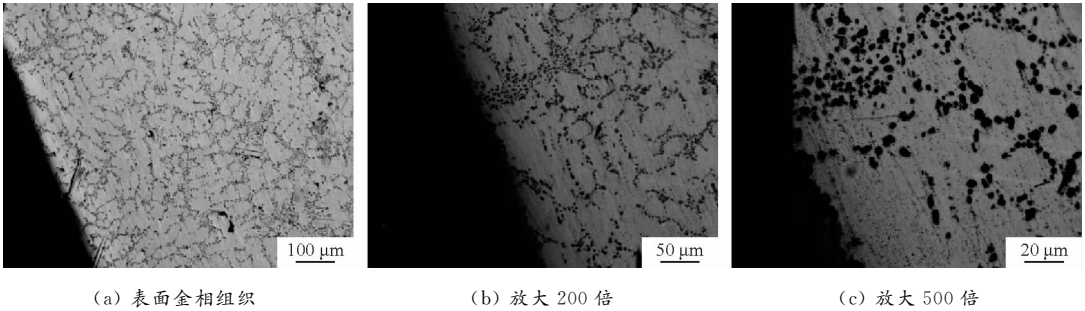


图 3 喷丸处理前试样表层的金相组织

Fig.3 Metallographic structure of the surface before shot peening

随后对喷丸处理的铸件加强筋处取样断面进行显微硬度测量，见图 2。结果表明，从试样表层到心部硬度逐渐下降，这是由于喷丸处理而形成的强化层具有一定厚度（约几十 μm ），且随着距表面距离的增加，喷丸强化效果逐渐减弱，直至消失。

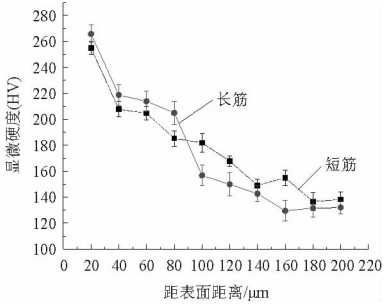


图 2 试样表层随深度方向的显微硬度变化

Fig.2 Microhardness variation of the material surface with depth direction

图 3 和图 4 分别为喷丸处理前后两种试样表层的金相组织。对比图 3 和图 4 可以发现，未经处理的合金中靠近表层区域共晶 Si 形状不太规则，而经过喷丸处理后由于喷丸粒子对铸件表面的高速撞击使试样表层发生一定程度的塑性变形，而处于表层组织中的共晶 Si 组织也同样因为喷丸的撞击发生变形，在外力的作用下由原来的不规则形状逐渐变为接近球状，可见喷丸处理可改善铸件加强筋的表层微观组织。经过喷丸处理后试样表层组织的形貌发生变化，由最初的较圆滑边界变为微观凹凸不平边界。与喷丸前试样相比，喷丸后试样接近表层部分组织变得较为均匀，这是因为经过喷丸处理使试样表层晶粒发生变形，表层变得较为均匀紧实，增加了表层组织的均匀性。原来组织中存在轻微共晶 Si 晶粒团聚的现象，通过喷丸处理使组织中团聚的部分得以碎化并使其细化，从而使更多的共晶组织均匀分布。且喷丸处理之后有更多的共晶 Si 均匀分布于表面，从表层沿深度变化，共晶 Si 分布均匀性逐渐减弱，可见喷丸作用仅限于表层。另外可以发现喷丸前试样组织中有轻微共晶 Si 聚集的现象，但经过喷丸处理之后共晶 Si 颗粒发生均匀化，且共晶 Si 颗粒更加细小。

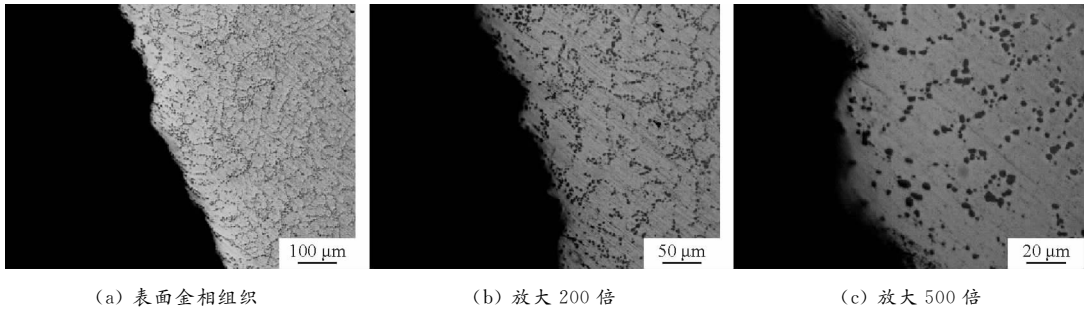


图 4 喷丸处理后合金表层的金相组织

Fig.4 Metallographic structure of the surface after shot peening

2.4 喷丸时间的影响

不同喷丸时间试样表层至心部的显微硬度见图 5。可以看出,随着测试位置距喷丸表层距离的增加,试样硬度总体呈下降趋势,且随着喷丸时间延长,试样表层发生更加严重的塑性变形,使得喷丸层的硬度逐渐上升。但是,由于喷丸处理会导致材料表面粗糙度提高,因此在喷丸工艺参数相同的条件下,喷丸时间过长会导致表层塑性变形严重,使试样表面产生裂纹,影响试样的服役性能与疲劳寿命^[12]。由试验可知,在 0~30 min 内随喷丸时间的增加试样表层硬度逐渐增加,在喷丸时间为 30 min 时可使表层硬度提高 1.35 倍,但考虑到工业生产需要及能源消耗问题,将喷丸时间继续延长,硬度增幅不明显,这样反而增加了能源与时间的损耗,降低生产效率,因此在实际生产中喷丸时间取 30 min 为宜。

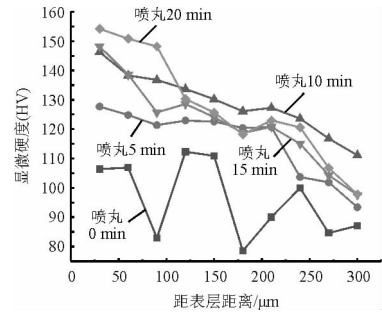


图 5 不同试样表层至心部显微硬度变化情况

Fig.5 Microhardness variation of different specimens from surface to core

图 6 和图 7 分别为不同喷丸时间试样的表层及心部的金相组织。可以看出,经过喷丸处理后表层组织的共晶 Si 明显减小,并随着喷丸时间增加,细化效果更加

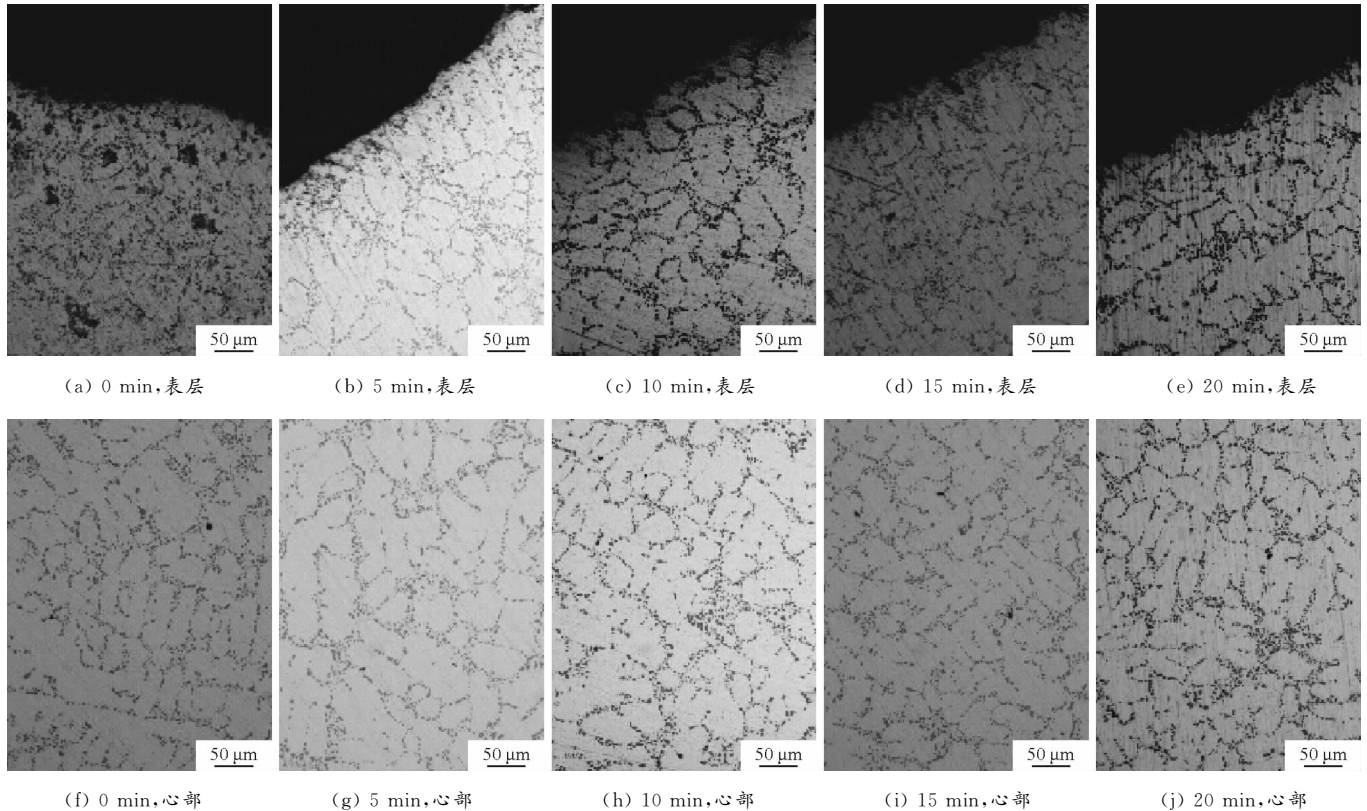


图 6 不同喷丸时间试样的金相组织

Fig.6 Metallographic structure of specimens with different shot peening times (low magnification)

明显,表层组织变得更加均匀,共晶 Si 晶粒变得更加细小均匀。喷丸处理能有效地细化组织,使共晶 Si 相分

布均匀。由于喷丸时高速粒子对表层的撞击作用会细化粗大的共晶 Si 相。

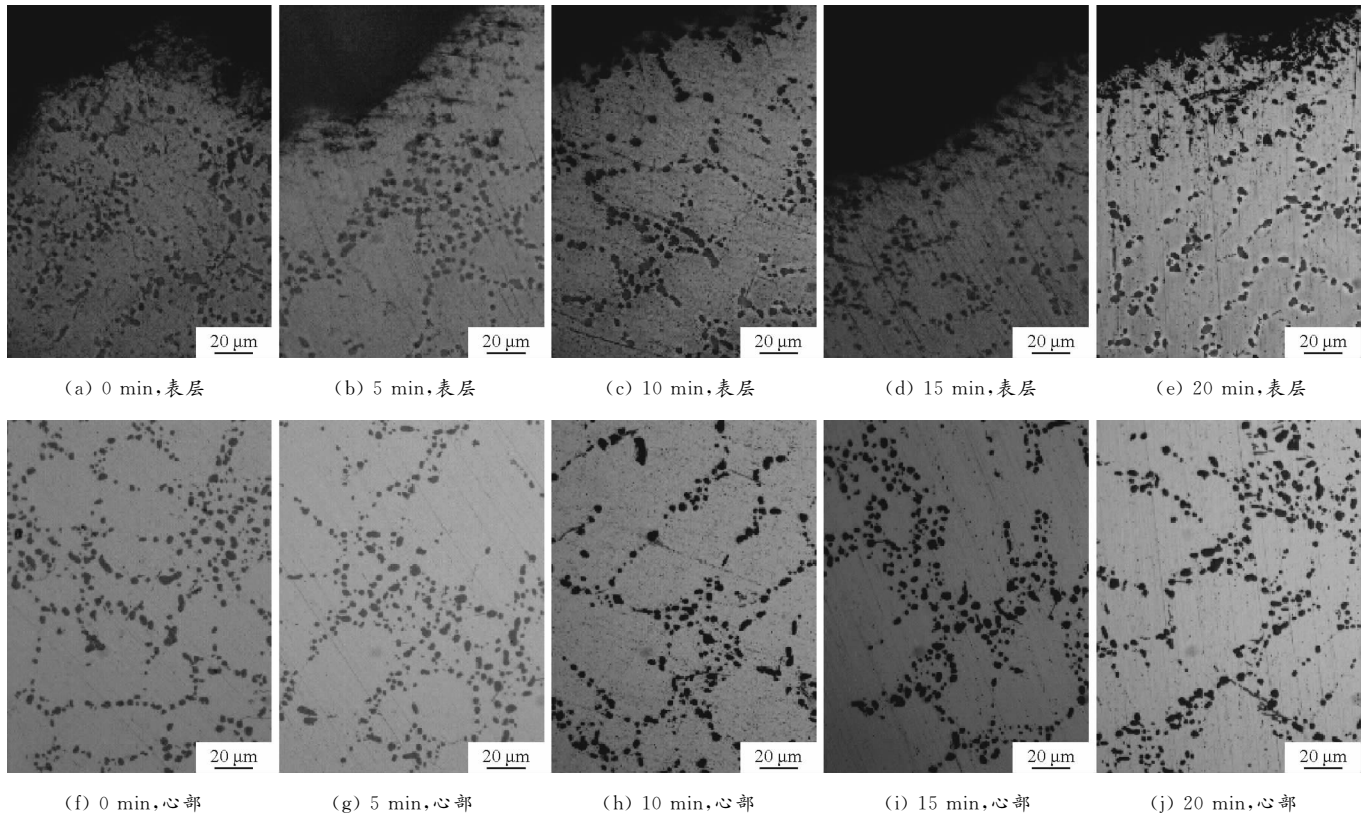


图 7 不同喷丸时间试样金相组织(高倍)

Fig.7 Metallographic structure of specimens with different shot peening times(high magnification)

对单一试样,由于喷丸处理使组织表层发生塑性变形^[13],共晶 Si 分布更加均匀,且随着喷丸时间的延长金相表层组织的均匀性增加;对于喷丸时间不同的试样,随着喷丸时间延长,表层的晶粒变得愈加细小,具有比心部更小且均匀的组织。

3 结 论

- (1)通过局部喷丸处理可以改善 A356 合金转向节表面的组织和力学性能。
- (2)A356 合金转向节经过表面喷丸处理之后,会在表层形成残余压应力,形成具有一定厚度的塑性变形层,该变形层的形成能够提高表层的硬度和塑性,改善疲劳性能;另外,通过局部喷丸还可以明显地细化表层组织中的共晶 Si 晶粒,使其形貌由粗块状转变为细小蠕虫状或颗粒状组织,使合金表层组织更加均匀细小。
- (3)通过喷丸处理在表层形成的压应力层在经过加热之后会消失,恢复至拉压应力交替存在的状态。因此喷丸后铸件推荐在受热温度较低的环境下使用较为合适(建议零件长时间使用温度低于 100 ℃),这样有利于保持铸件局部的喷丸强化效果。
- (4)通过喷丸处理形成的塑性变形层具有一定厚

度,且从表层至心部强化效果逐渐弱化。随着喷丸时间增加,合金表层硬度呈现逐渐上升的趋势,但到后期继续延长喷丸时间,硬度增加趋势不明显,反而会对材料表面产生损伤,增大表层应力集中倾向。

参 考 文 献

[1] 肖阳.表面喷丸强化改善 7075 铝合金疲劳寿命的试验研究[J].轻合金加工技术, 2016, 44(10): 46-49.

[2] 王正科.铝合金在汽车轻量化中的应用[J].时代汽车, 2021(1): 113-114.

[3] ZHAN K, JIANG C H, JI V. Effect of prestress state on surface layer characteristic of S30432 austenitic stainless steel in shot peening process[J].Materials and Design, 2012, 42: 89-93.

[4] ALI A, AN X, RODOPOULOS C A, et al. The effect of controlled shot peening on the fatigue behaviour of 2024-T3 aluminium friction stir welds[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29 (8): 1 531-1 545.

[5] CHO K T, SONG K, SANG H O, et al. Surface hardening of aluminum alloy by shot peening treatment with Zn based ball[J]. Materials Science and Engineering, 2012, A543(5): 44-49.

[6] RODOPOULOS C A, CURTIS S A, RIOS E R D L, et al. Optimization of the fatigue resistance of 2024-T351 aluminium alloys by controlled shot peening-methodology, results and analysis[J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(8): 849-856.

[7] 荣祖兰.表面喷丸改善铝合金高周疲劳寿命的试验研究[J].热加工工艺, 2016, 45(4): 134-136.

接触网零部件定位支座本体低压铸造工艺设计

周本建

(中铁建电气化局集团轨道交通器材有限公司)

摘要 利用 MagMa 软件对 L 型定位支座本体铸件低压铸造工艺进行模拟分析,预测铸件内部极易出现的缺陷位置和大小。模拟结果表明,铸件在整个充型过程中,铝液流动平稳,未出现卷气、浇不足等现象。通过剖切中间面,未见缩松、缩孔等铸造缺陷,浇注系统设计合理。通过小批量生产验证,铸件外观满足要求,合格率达 98% 以上。

关键词 低压铸造;铝合金定位支座本体;数值模拟

中图分类号 TG249.2;TP311;TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.10.023

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of Low Pressure Casting Process for Catenary Parts Positioning Support Body

Zhou Benjian

(Group Rail Transit Equipment Co., Ltd., China Railway Construction and Electrification Bureau)

Abstract: The MagMa software was used to simulate and analyze the low pressure casting process of the L-shaped positioning support body, and to predict the location and size of the defects easy to appear in the castings. The simulation results show that during the whole filling process of the castings, the molten aluminum flows smoothly, and there exists absence of entrapped-gas or cold shut. Through cutting the middle surface, absence of casting defects such as porosity and shrinkage could be observed, showing reasonable pouring system design. Through small batch production verification, the appearance of the product meets the requirements of the drawing, and the product qualification rate is more than 98%.

Key Words: Low Pressure Casting, Aluminum Alloy Positioning Support Body, Numerical Simulation

高速铁路具有运载能力大、运行速度快、运输效率高特点,随着高铁技术的不断进步,也对接触网零部件的性能提出了更高的要求。定位支座本体是定位装置中最重要的零部件之一,其性能的优劣,直接影响到定位器与受电弓匹配的合理性。定位支座本体结构复杂,壁厚不均,使用金属型重力铸造,极易产生卷气、缩松、缩孔和裂纹等铸造缺陷,铸件合格率低。利用数值模拟软件对低压铸造凝固过程中的充型流场和温度场进行分析,减少或防止卷气、缩松、缩孔和裂纹等铸造缺陷的产生^[1~8],验证低压铸造工艺及模具结构设计的合

理性,提高铸件的品质和成品率。

1 定位支座材料与结构分析

定位支座为 L 型,轮廓尺寸为 210 mm×90 mm×100 mm,铸件壁厚差大,最薄处为 8 mm,最厚处为 30 mm,实体模型见图 1。选用高强度、耐腐蚀性良好的 AlSi7Mg0.6 铝合金,其化学成分见表 1,该铸件按铁路标准 TB/T 2074 规定为二类铸件,X 射线探伤等级为 A 级,铸件不允许有裂纹、冷隔、穿透性和对应性缺陷。

收稿日期:2021-03-14;修改稿收到日期:2021-05-23

作者简介:周本建,男,1971 年出生,高级工程师,江苏常州(213179),E-mail:xunby2010@163.com

引用格式:周本建. 接触网零部件定位支座本体低压铸造工艺设计[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(10):1 330-1 302.

ZHOU B J. Design of low pressure casting process for catenary parts positioning support body[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(10):1 330-1 302.

[8] 陈超,陈芙蓉,解瑞军,等.高能喷丸处理对 7A52 铝合金表面微观组织结构及性能的影响[J].材料导报,2017, 31(14): 96-99.

[9] 王帅. 喷丸残余应力和表面粗糙度对疲劳寿命的综合影响研究[D].济南:山东大学,2018.

[10] 姜峰,索忠源,关鲜洪,等.热处理对混合稀土变质 A356 合金组织及力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2020, 40(12): 1 414-1 417.

[11] 付浩,吴红燕,曹炳鑫,等.超声处理对 Mg-9Al-3Si 合金组织及力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2021, 41(1): 73-77.

[12] 胡磊. 铝合金喷丸工艺预测函数的构建及应用[D].长沙:中南林业科技大学,2019.

[13] 陈家伟. 铝合金喷丸工艺参数-表面特征值函数的构建[D].长沙:中南林业科技大学,2020.

(编辑:栗万仲)