

文章编号:1673-9981(2012)03-0153-06

# 半固态锻造 A356 铝合金轮毂的组织与性能\*

戚文军,王顺成,蔡 畅,王海艳

广东省工业技术研究院(广州有色金属研究院)金属加工与成型技术研究所,广东 广州 510650

**摘要:**对低温浇注 A356 铝合金的组织 and 二次加热组织转变规律及半固态锻造铝合金轮毂的组织与力学性能进行了研究.结果表明:在 635~655 °C 下浇注,可获得具有细小均匀、近球形晶粒的 A356 铝合金圆棒坯,圆棒坯在 600 °C 下加热 60 min,晶粒进一步球化;在 750 kN 锻压力下可锻造成铝合金轮毂,经 T6 热处理后,轮毂的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 327.6 MPa, 228.3 MPa 和 7.8%.表明,低温浇注法制备半固态坯料与半固态锻造工艺相结合,可生产出高性能的铝合金轮毂.

**关键词:**铝合金轮毂;半固态金属;锻造;低温浇注  
**中图分类号:** TG146 **文献标识码:** A

铝合金轮毂有质量轻、减震性强和外形美观等优点,使用铝合金轮毂是汽车实现轻量化和节能减排的重要措施之一.目前铸造铝合金轮毂已广泛应用于轿车上,但其性能尚不能满足载货车和大客车的要求.虽然塑性锻造铝合金轮毂的性能更好、重量更轻,但锻造工艺复杂,需要大型锻造设备和大量的机械加工等,使得塑性锻造铝合金轮毂生产成本较高<sup>[1]</sup>.

半固态锻造是将具有非枝晶组织的半固态坯料经二次加热后,在预热的模具型腔内直接锻造成形,获得接近成品尺寸零件的工艺.与铸件相比,半固态锻造件具有更高的组织致密度及更好的力学性能.与塑性锻造工艺相比,半固态锻造需要的锻压力更低,可实现复杂零部件的一次近终锻造成形<sup>[2]</sup>.半固态锻造首先需要制备具有非枝晶组织的半固态坯料,制备方法有机械搅拌、电磁搅拌、喷射沉积及应变诱发熔化激活法等<sup>[3]</sup>.但这些方法需要特殊的设备或者复杂的工艺,使得半固态锻造生产成本也较高.

低温浇注法是通过控制浇注温度来制备半固态坯料,该法无需特殊设备,工艺也相对简单,有利于降低坯料制备成本<sup>[4-5]</sup>.为了获得高性能的铝合金

轮毂,并降低铝合金轮毂的生产成本,本文中 will 低温浇注法所制备的半固态坯料应用于半固态锻造 A356 铝合金轮毂,并对低温浇注 A356 铝合金圆棒坯的组织、二次加热组织的转变规律及半固态锻造铝合金轮毂的组织与力学性能进行了研究.

## 1 实验材料与方法

**原料:**实验材料为 A356 铝合金,其由工业纯铝(质量分数为 99.7%)、速溶硅(质量分数为 99.2%)和纯镁(质量分数为 99.85%)熔炼配制而成,熔炼设备为 7.5 kW 井式电阻炉和石墨坩埚.经 SPECTRO-MAXx 直读光谱仪测定, A356 铝合金的成分为  $w(\text{Si})=7.15\%$ ,  $w(\text{Mg})=0.45\%$ ,  $w(\text{Fe})=0.14\%$ ,  $w(\text{Mn})=0.01\%$ ,  $w(\text{Cu})=0.01\%$ ,  $w(\text{Ni})=0.05\%$ ,  $w(\text{Zn})=0.01\%$ , 余量为 Al. 在 NETZSCH STA449C 型综合热分析仪上对合金进行差示扫描量热分析(DSC),确定合金的液相线温度为 617.3 °C.

**方法:**在 720 °C 下于电阻坩埚炉内熔化 A356 铝合金,分别加入 0.1% 的 Al-5Ti-1B 和 Al-10Sr 合金料进行细化变质处理<sup>[6]</sup>,经精炼和扒渣后,分别于 675, 655, 635 和 617 °C 下浇注到水冷铁模中,铸成直径

收稿日期:2012-07-30

\*基金项目:广州有色金属研究院科技创新基金项目资助(2009A010)

作者简介:戚文军(1956-),男,上海人,教授级高工.

为100 mm、高为250 mm的圆棒坯。随后对圆棒坯取样,所取试样经磨制、抛光及腐蚀后,在LEICA-DMI3000M型金相显微镜下进行组织观察。

圆棒坯二次加热设备为15 kW箱式热处理炉及直径为100 mm、高为120 mm的不锈钢料杯。圆棒坯经锯切后置于不锈钢料杯内,于600 °C下分别等温二次加热20, 40, 60和80 min,然后取样水淬,水淬试样经磨制、抛光和腐蚀后进行组织观察。

为了检验低温浇注A356铝合金圆棒坯的半固态锻造性能,圆棒坯在580~610 °C下分别加热不同时间后,在200 t四柱立式油压机上进行半固态锻造实验,模具装配如图1所示。轮毂毛坯外径为165 mm,高80 mm。模具预热温度为200~500 °C,锻压力为500~1000 kN,保压时间为3~5 s。实验完成后,分别在半固态锻造铝合金轮毂的轮辐、轮辋及轮辐和轮辋的过渡部位上取样进行组织观察。铝合金轮毂经T6热处理(535 °C固溶6 h, 180 °C时效6 h)后,加工成矩形拉伸试样,在DNS200电子拉伸试验机上进行室温拉伸实验,拉伸变形速率为2 mm/min。

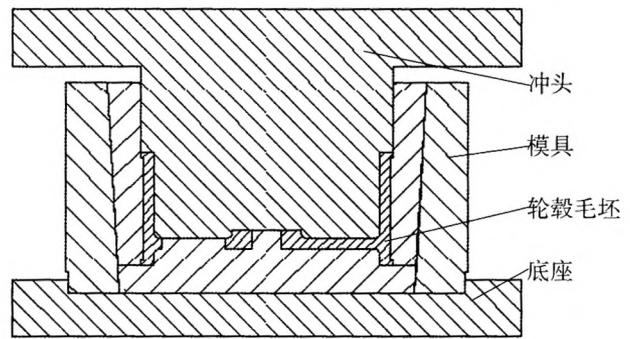


图1 模具结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the forging die

## 2 结果与讨论

### 2.1 浇注温度对圆棒坯组织的影响

熔体浇注温度越低,合金冷却凝固速率越快,有利于晶粒尺寸的细化及抑制枝晶的生长<sup>[9]</sup>。图2为不同温度下浇注A356铝合金圆棒坯的显微组织。从图2可见:当浇注温度为675 °C时,圆棒坯组织主要为粗大的 $\alpha$ -Al枝晶(图2(a));当浇注温度降至

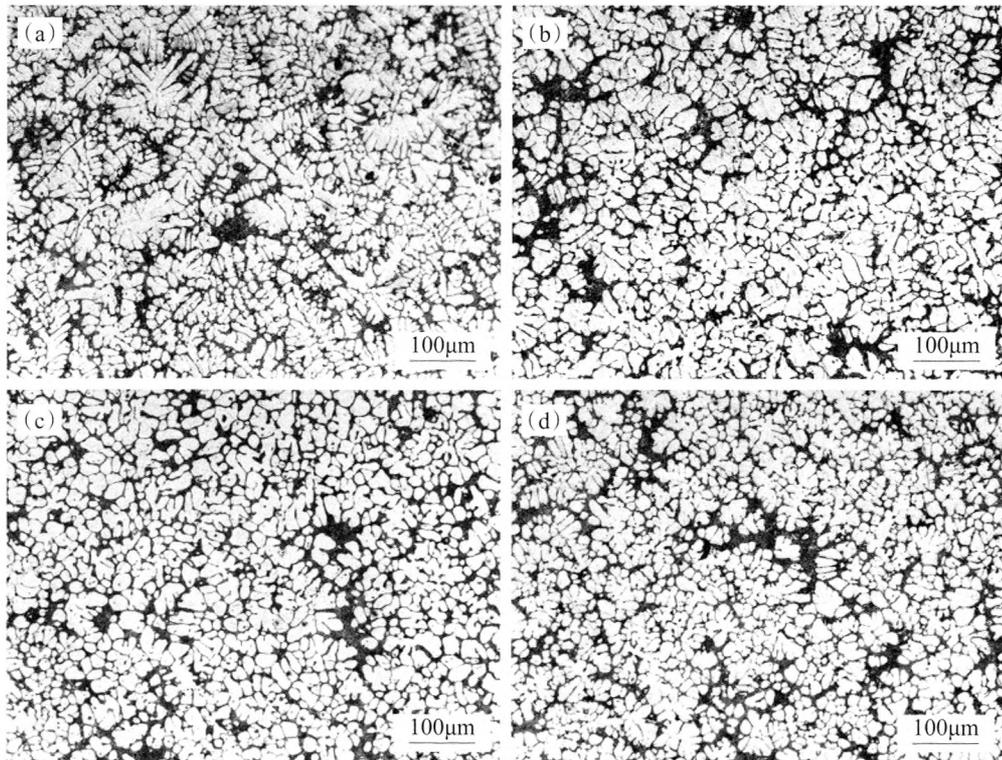


图2 不同温度浇注A356铝合金圆棒坯的显微组织

(a) 675 °C; (b) 655 °C; (c) 635 °C; (d) 617 °C

Fig.2 Microstructures of A356 aluminum alloy round billets poured at different temperatures

655 °C 和 635 °C 时,圆棒坯组织转变为细小均匀的近球形 $\alpha$ -Al 晶粒(图 2(b)和图 2(c));当浇注温度降至合金液相线温度 617 °C 时,晶粒更加细小和圆整(图 2(d)).但实验过程中发现,在 617 °C 下浇注,合金熔体流动性较差,浇注后凝固速度快,容易导致棒坯卷气和夹杂,棒坯表面出现冷隔等铸造缺陷.因此,低温浇注法制备 A356 铝合金圆棒坯的合理浇注温度为 635 ~ 655 °C,圆棒坯内部显微组织为细小均匀的近球形 $\alpha$ -Al 晶粒,表面质量良好(图 3).

## 2.2 圆棒坯二次加热组织的演变

半固态坯料二次加热的目的,首先是使坯料通过部分重熔获得一定体积的液相,其次是使坯料的非枝晶组织晶粒进一步得到球化,恢复坯料的半固态特性.坯料二次加热组织转变的驱动力是固液界面能降低,由于小晶粒和枝晶具有更大的比表面积,从而具有更高的界面能,在二次加热过程中它们会逐渐长大和球化,以降低系统界面能<sup>[9]</sup>.晶粒长大机制一是相邻晶粒之间通过界面迁移发生合并长大,另一个是晶粒的 Ostwald 熟化,即大晶粒继续长大,而小晶粒则逐渐熔化,同时晶粒逐渐趋于球

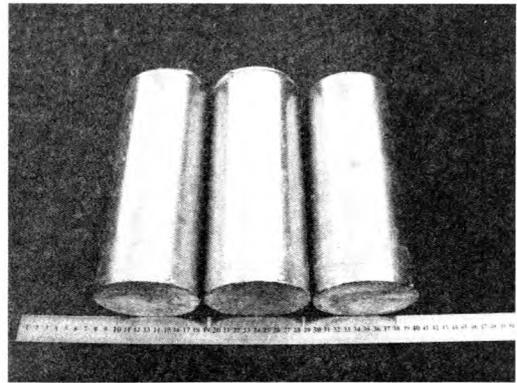


图3 低温浇注 A356 铝合金圆棒坯

Fig.3 A356 aluminum alloy round billets prepared by pouring at low temperature 635-655 °C

化<sup>[7]</sup>.图 4 为低温浇注 A356 铝合金圆棒坯在 600 °C 下分别等温二次加热 20, 40, 60 和 80 min 后的水淬组织.从图 4 可见:加热 20 min 时,由于加热时间较短,晶间尚未出现液相(图 4(a));加热 40 min 时,低熔点共晶相开始发生部分熔化,晶间出现了少量液相,晶粒开始趋于球形(图 4(b));加热 60 min 时,晶间已存在大量液相,液相体积分数大约为 40%,晶粒明显球化,晶界清晰光滑,适合于半固态锻造成

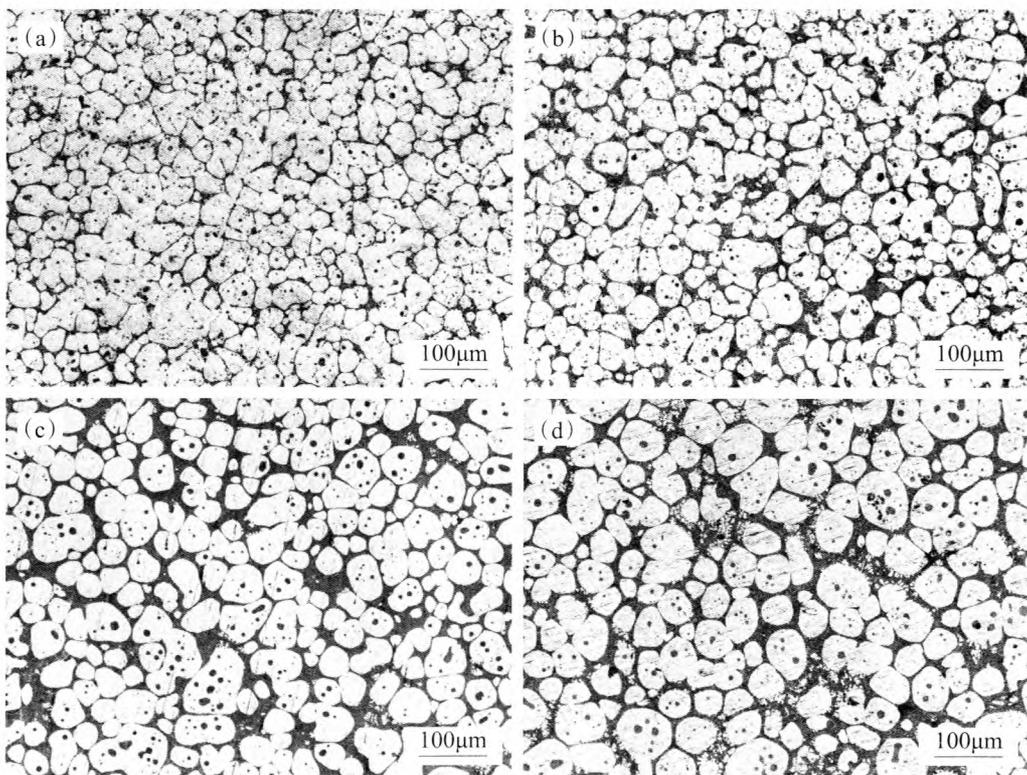


图4 A356 铝合金圆棒坯 600 °C 加热不同时间的组织

Fig.4 Microstructures of A356 alloy round billets reheated at 600 °C for different time (a)20 min; (b)40 min; (c)60 min; (d)80 min

形(图4(c)).另外,由于晶粒在合并和 Ostwald 熟化过程中包裹了部分共晶相于 $\alpha$ -Al晶粒内,因此随着加热时间的延长,晶内共晶组织也发生了重熔并逐渐长大及球化,形成晶内小液相池<sup>[9]</sup>.继续加热至80 min时,液相的体积分数无明显变化,但晶粒继续长大(图4(d)).由于晶粒过于粗大,不利于铝合金轮毂的锻造成形及力学性能的提高.因此,低温浇注A356铝合金圆棒坯适宜的二次加热工艺应为600℃下加热60 min.

### 2.3 半固态锻造铝轮毂的组织与性能

在半固态锻造成形中,坯料温度及模具预热温度对坯料充填模腔有明显的影响,温度太低,坯料无法完全充满模腔,而温度太高,则又难以获得组织均匀、力学性能高的半固态锻造铝合金轮毂.经过大量实验结果表明,在600℃下加热60 min、模具预热温度为350℃及在750 kN锻压力条件下,坯料可锻造成铝合金轮毂.由于半固态合金浆料的温度较低,粘度比合金液高,在锻造成形过程中浆料流动充型平稳,可避免喷溅而卷入气体;同时在锻造成形时,半固态浆料中已有部分固相晶粒存在,锻造后合金凝固收缩率低,对补缩要求也低,可避免产生缩孔、疏松等缺陷,最终有利于提高半固态锻造件的组织致密度和表面尺寸精度<sup>[9]</sup>.图5为半固态锻造A356铝合金轮毂样件.从图5可见,半固态锻造A356铝合金轮毂充型完整,经表面机械加工后,轮毂内、外表面光亮,未发现有缩孔、疏松等缺陷存在.

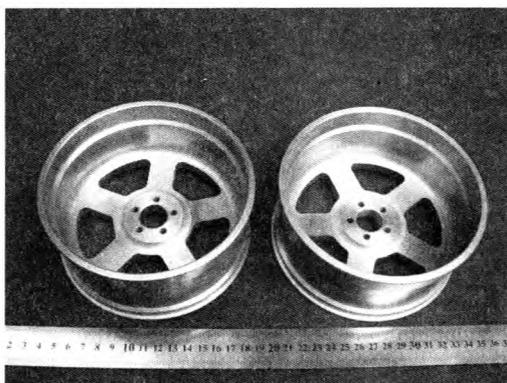


图5 半固态锻造 A356 铝合金轮毂

Fig.5 Semisolid forged A356 aluminum alloy wheels

圆棒坯经过二次加热后,转变为固相晶粒悬浮于液相之中的半固态浆料,在半固态锻造过程中其变形机制主要为液相包裹固相晶粒一起流动变形<sup>[10]</sup>.图6为半固态锻造A356铝合金轮毂的显微组

织.从图6可见,半固态锻造A356铝合金轮毂的组织为球形 $\alpha$ -Al晶粒和 $\alpha$ +Si共晶组织组成.在锻压变形过程中,由于浆料内部液相和固相的流动速度存在差异,其中液相的内摩擦力较小,流动速度略快,而固相晶粒内摩擦力较大,流动速度则相对较慢,从而使半固态锻造铝合金轮毂组织存在轻微的宏观液相偏析<sup>[11]</sup>.其中,锻造变形量较大的轮辐部位的组织中共晶相略少些(图6(a)),而轮辋部位组织中共晶相则略多些(图6(c)).

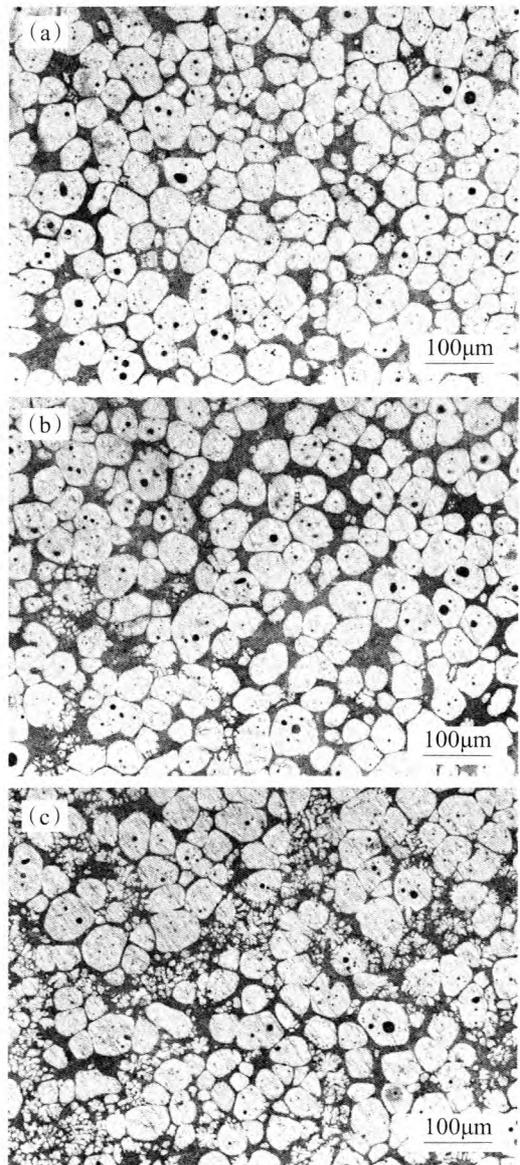


图6 半固态锻造 A356 铝合金轮毂的显微组织  
(a) 轮辐部位;(b) 轮辐与轮辋过渡区;(c) 轮辋部位

Fig.6 Microstructures of semisolid forged A356 aluminum alloy wheels

(a) wheel arm;(b) position between wheel arm and rim;  
(c) wheel rim

图7为经T6热处理前后半固态锻造A356铝合金轮毂显微共晶组织形貌图。从图7可见:由于在合金熔炼过程中添加了Al-10Sr中间合金进行细化变质处理,因此未经热处理的轮毂中共晶Si主要呈细小的短纤维状(图7(a));经T6热处理后的轮毂,其

共晶组织中的Mg元素和部分Si元素固溶进入 $\alpha$ -Al基体中,并在时效过程中析出弥散细小的 $Mg_2Si$ 相,该相起到强化合金的作用<sup>[12]</sup>,剩余的共晶Si则分解转变为细小颗粒状单晶Si(图7(b))。

表1为半固态锻造A356铝合金轮毂经T6热处

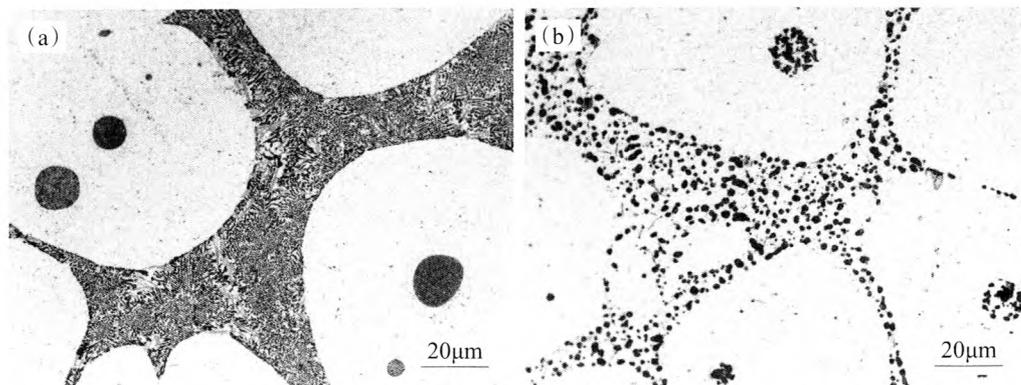


图7 半固态锻造A356铝合金轮毂T6热处理前后的显微共晶组织  
(a)未热处理;(b)T6热处理

Fig.7 Microstructures of semisolid forged A356 aluminum alloy wheels  
(a)without T6 treatment;(b)with T6 treatment

理后的拉伸力学性能。由表1可知,由于轮辐部分锻压变形量较大,因而轮辐的抗拉强度、屈服强度及伸长率均略高于轮辋的。但是半固态锻造A356铝合金轮毂的轮辐和轮辋的拉伸力学性能,均高于金属型重力铸造、低压铸造及挤压铸造的A356铝合金轮毂的拉伸力学性能<sup>[1]</sup>,这主要归功于半固态锻造

A356铝合金轮毂的组织为球形 $\alpha$ -Al晶粒的非枝晶组织,无缩孔及组织疏松等缺陷,轮毂的组织致密度更高,热处理强化效果更好。上述研究结果表明,低温浇注法制备半固态坯料与半固态锻造工艺相结合,可生产出高性能铝合金轮毂,并有利于降低铝合金轮毂的生产成本。

表1 半固态锻造A356铝合金轮毂的拉伸力学性能

Table 1 Tensile mechanical properties of semisolid forged A356 aluminum alloy wheels

	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
轮辋	324.2	225.7	7.3
轮辐	327.6	228.3	7.8

### 3 结论

(1)随着浇注温度的降低,棒坯组织从枝晶逐渐转变为细小的近球形晶。在635~655℃下浇注,可得到表面质量良好及内部组织为细小均匀近球形晶粒的A356铝合金圆棒坯。

(2)A356铝合金圆棒坯在600℃下等温二次加热60 min,其晶粒进一步球化,液相体积分数约为40%,适合于半固态锻造成形。

(3)半固态锻造铝合金轮毂的合理工艺参数为

锻压力750 kN、模具预热温度350℃、保压时间3 s。

(4)轮毂经T6热处理后,轮辋的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为324.2 MPa, 225.7 MPa和7.3%,轮辐的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为327.6 MPa, 228.3 MPa和7.8%。

#### 参考文献:

- [1] 李平,陈丹团,王祝堂.铝合金车轮生产与性能[J].轻合金加工技术,2011,39(11):1-20.
- [2] ZHU Q, MIDSON S P. Semi-solid moulding: competition to cast and machine from forging in making automotive

- complex components[J].Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(S3): 1042-1047.
- [3] 刘尧, 李凤, 胡永俊. 金属半固态成形技术的应用现状及发展前景[J]. 材料研究与应用, 2008, 2(4): 304-308.
- [4] LASHKARI O, NAFISI S, GHOMASHCHI R. Microstructural characterization of rheo-cast billets prepared by variant pouring temperatures [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 441: 49-59.
- [5] 李景潭, 王顺成, 戚文军, 等. 浇注温度和细化剂对半固态 A356 合金组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31(6): 525-528.
- [6] 王顺成, 戚文军, 郑开宏, 等. 低过热度铸造半固态 LY12 铝合金二次加热的组织演变规律[J]. 材料研究与应用, 2011, 5(2): 87-91.
- [7] TZIMAS E, ZAVALIANGOS A. Evolution of near-equiaxed microstructure in the semisolid state[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 289: 228-240.
- [8] CHEN T J, HAO Y, SUN J. Formation of liquid pools entrapped within solid grains of ZA27 alloys during partial remelting[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2002, 18(6): 481-483.
- [9] FLEMINGS M C. Behavior of metal alloys in the semisolid state [J]. Metallurgical Transactions A, 1991, 22(5): 957-981.
- [10] 罗守靖, 孙家宽. LY12 合金半固态压缩变形机制研究[J]. 科学通报, 1999, 44(5): 545-549.
- [11] 陈晓阳, 毛卫民, 钟雪友. 半固态 Al-7%Si 合金压缩变形下的液相偏析研究[J]. 机械工程材料, 1998, 22(4): 25-27.
- [12] 张恒华, 许珞萍, 邵光杰, 等. AlSi7Mg 合金半固态压铸件热处理强化机理研究[J]. 材料热处理学报, 2003, 24(2): 62-65.

## Microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy wheel made by semisolid forging

QI Wenjun, WANG Shuncheng, CAI Chang, WANG Haiyan

*Institute of Metal Processing and Forming Technology, Guangdong General Research Institute of Industrial Technology, Guangzhou 510650, China*

**Abstract:** The as-cast microstructures, the microstructure evolution during reheating and the mechanical properties of forged wheels of semisolid A356 aluminum alloy prepared by pouring at low temperature were studied. The results show that the A356 aluminum alloy round billet with fine, uniform and near-globular grains can be obtained when the melt is poured in the temperature range of 635-655 °C. When the round billet is reheated at 600 °C for 60 min, the near-globular grains change into globular ones and the round billet can be easily forged into wheels. The tensile strength, yield strength and elongation of forged wheels with T6 heat treatment are 327.6 MPa, 228.3 MPa and 7.8%. The present experimental results indicate that the semisolid forging combining with the pouring at low temperature is an effective technique to produce aluminum alloy wheels with high mechanical properties at low production cost.

**Key words:** aluminum alloy wheel; semisolid metal; forging; low temperature pouring