

# 高速磁浮列车用 ZL105A 合金摇臂壳体铸造工艺研究

黄 粒<sup>1,2</sup> 高艳丽<sup>1,2</sup> 刘崇证<sup>1,2</sup> 王海龙<sup>1,2</sup> 杜旭初<sup>1,2</sup>

(1.中国航发北京航空材料研究院; 2.北京市先进铝合金材料及应用工程技术研究中心)

**摘 要** 采用低压铸造生产了 ZL105A 合金摇臂壳体。针对 ZL105A 合金以及铸件的结构特点及性能要求,从熔体精炼、合金化、铸造工艺设计和 ProCAST 仿真等 4 个方面进行了优化,并分析了摇臂壳体铸件的铸造工艺要点。结果表明,采用六氯乙烷与氩气旋转喷吹复合精炼,配合 Be 合金化,可有效提升 ZL105A 合金的综合力学性能。采用低压砂型浇注工艺,配合底注式+缝隙浇注系统和厚大部位放置冷铁的方式,可生产出内部品质良好的摇臂壳体铸件,铸件本体抗拉强度、屈服强度、伸长率最高可达 318 MPa、261 MPa、5.6%,本体疲劳性能、内部品质与尺寸均满足设计指标要求。

**关键词** ZL105A;摇臂壳体;数值模拟;低压铸造

**中图分类号** TG146.21;TG249.2 **文献标志码** A

**DOI**:10.15980/j.tzzz.2022.01.023

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Casting Technology of ZL105A Alloy Rocker Arm Shell Casting for High-speed Maglev Vehicle

Huang Li<sup>1,2</sup>, Gao Yanli<sup>1,2</sup>, Liu Chongzheng<sup>1,2</sup>, Wang Hailong<sup>1,2</sup>, Du Xuchu<sup>1,2</sup>

(1.Beijing Institute of Aeronautical Materials;

2.Beijing Engineering Research Center for Advanced Aluminum Alloys)

**Abstract:** ZL105A rocker arm shell casting was fabricated by low pressure casting. According to the structural characteristics and performance requirements for ZL105A alloy and the casting, the optimization of ZL105A alloy was carried out from the aspects of melt refining, alloying, casting process design and ProCAST numerical simulation, and the key points for casting process of rocker arm shell castings were analyzed. The results indicate that the comprehensive mechanical properties of ZL105A alloy can be effectively improved by compound refining of hexachloroethane and argon rotary injection, combined with Be alloying. The low-pressure sand casting process, combined with bottom pouring+slot gating system and the method of placing cold iron on thick and large parts were adopted to obtain rocker arm shell casting with desirable internal quality, where the mechanical properties of the casting body can reach up to  $\sigma_b \geq 318$  MPa,  $\sigma_{0.2} \geq 261$  MPa,  $\delta_5 \geq 5.6\%$ , respectively, and body fatigue performance, internal quality and dimension meet the designing index requirements.

**Key Words:** ZL105A, Rocker Arm Shell Casting, Numerical Simulation, Low Pressure Casting

高速磁悬浮列车是我国交通领域的重点发展对象<sup>[1]</sup>。摇臂壳体铸件是时速 600 km 高速磁浮列车运行系统的关键承力部件,对本体力学性能和疲劳性能要求较高,铸件品质直接关系整车运行安全性与可靠性。为突破国外的供应封锁,实现我国 600 km 级及以上无轮轨高速列车关键部件的自主供应保障,形成自主知识产权与完整的技术迭代升级,摇臂壳体铸件的国产化研制具有重要意义。摇臂壳体铸件除要求较高的力学性能外,对铸件的疲劳性能以及可靠性也提出了明确的要求<sup>[2,3]</sup>。本课题以摇臂壳体铸件为研究对象,综合考虑

合金特性和铸件的结构特点及服役要求,从浇注工艺、熔体处理等方面入手进行了分析研究,可为高速磁浮列车运行系统用关键部件提供工艺设计参考。

### 1 铸件结构特点及技术要求

摇臂壳体铸件外形尺寸约为 1 200 mm×160 mm×80 mm(见图 1)。铸件整体为平板结构,且壁厚较小(平均壁厚约为 4 mm),存在多处热节区,为 I 类铸件。要求本体力学性能:抗拉强度 $\geq 280$  MPa,屈服强度 $\geq 235$  MPa,伸长率 $\geq 3\%$ 。铸件需承受至少 1 000

收稿日期:2021-07-03;修改稿收到日期:2021-07-13  
第一作者简介:黄粒,男,1987 年出生,高级工程师,北京(100095),E-mail:hl\_biam@163.com  
通信作者:杜旭初,男,1982 年出生,高级工程师,北京(100095),E-mail:torden@163.com  
引用格式:黄粒,高艳丽,刘崇证,等. 高速磁浮列车用 ZL105A 合金摇臂壳体铸造工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(1):112-115.  
HUANG L, GAO Y L, LIU C Z, et al. Casting technology of ZL105A alloy rocker arm shell casting for high-speed maglev vehicle[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(1):112-115.

万次的疲劳循环载荷,要求铸件本体切取疲劳性能满足:当  $R=-1$ (疲劳试验应力比),疲劳最大应力为 90 MPa 时,疲劳寿命不小于  $10^7$  次。

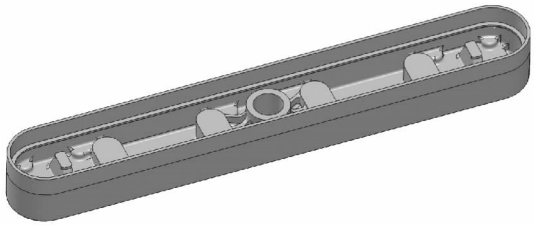


图1 摇臂壳体铸件三维模型

Fig.1 Three-dimensional model of the rocker arm shell casting

2 试验材料与方法

铸件采用 ZL105A 合金,化学成分符合 GB/T 1173-2013 的要求。相比 ZL101A 合金,具有更高的强度与更好的气密性<sup>[2,3]</sup>。采用电阻炉进行合金熔炼,将高纯铝、Al-12Si、Al-50Cu 中间合金放入铸铁坩埚,升温 850 ℃保温至完全熔化后,搅拌 30 min;降温至 700 ℃,加入纯 Mg,搅拌 15 min。采用不同质量分数(0.6%、0.78%)的精炼剂( $C_2Cl_6$ )和 Ar 气精炼喷吹 20 min 对熔体进行除气、除渣,加入 Al-5Ti-1B 中间合金丝进行细化处理,采用低压+砂型铸造生产,铸件实测化学成分见表 1。

表 1 ZL105A 合金的化学成分

| 成分 | Tab.1 Chemical composition of the ZL105A alloy % |         |          |       |      |       |       |       |       |    |
|----|--------------------------------------------------|---------|----------|-------|------|-------|-------|-------|-------|----|
|    | $w_B$                                            |         |          |       |      |       |       |       |       |    |
|    | Si                                               | Cu      | Mg       | Mn    | Ti   | Zn    | Fe    | Sn    | Pb    | Al |
| 标准 | 4.5~5.5                                          | 1.0~1.5 | 0.4~0.55 | <0.1  | —    | <0.1  | 0.2   | <0.05 | <0.05 | 余量 |
| 实测 | 4.68                                             | 1.12    | 0.43     | <0.01 | 0.11 | 0.027 | 0.036 | <0.01 | <0.01 | 余量 |

对铸件进行 T6 热处理(525 ℃×6 h 固溶,水冷,160 ℃×5 h 时效)。在 MTS-Landmark 试验机上进行室温拉伸性能和高周轴向疲劳性能测试,试样尺寸符合 GB/T 228.1-2010 要求<sup>[4]</sup>。拉伸速率为 1 mm/min,  $R=-1$ ,最大应力为 90 MPa,加载频率为 120 Hz。采用 LEICA DM1750M 金相显微镜观察铸件的显微组织,采用 Sigma 300 扫描电镜观察拉伸断口组织。采用 RT-CQ1000 型铝熔体测氢仪测试熔体中的氢含量。

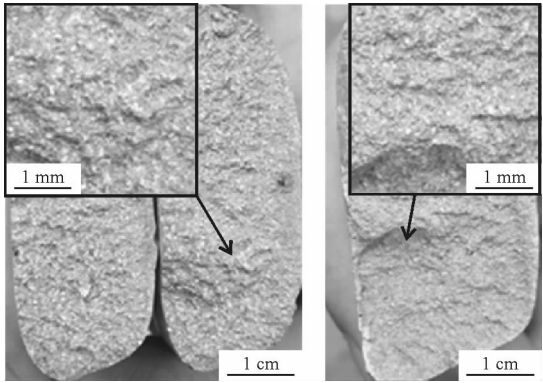
3 试验结果与讨论

3.1 ZL105A 合金熔体处理

摇臂壳体铸件需具备较好的疲劳性能,要求其微观组织致密,且不允许有缩松、裂纹缺陷,需严格控制铸件的针孔缺陷程度<sup>[5~7]</sup>。ZL105A 合金中的 Si 含量为 4.5%~5.5%,Mg 含量为 0.40%~0.55%,合金吸氢倾

向较严重,容易产生针孔,常规熔炼方式时熔体中固溶的氢较多,铸件在凝固过程中易产生超标的针孔缺陷,因此采用加强精炼的方式降低铸件中的针孔度。

图 2 为在不同精炼工艺后的 ZL105A 合金试块断口形貌。由图 2a 可以看出,精炼后的熔体断口呈灰色,且断面存在明显的大尺寸白点(针孔)和少量黑色夹杂。增加精炼剂用量,然后采用高纯氩气喷吹处理(喷吹 20 min)后的断口见图 2b,可见断面白点(针孔)数量明显减少且白点尺寸明显变小,熔体冶金效果提升明显。在精炼过程中, $C_2Cl_6$ 在高温下分解产生的  $Cl_2$ 以小气泡形式从合金液中排出,将熔渣吸附一并排出,而同时由于 H 分压的原因, $Cl_2$ 可以吸附、溶解部分合金液中的 H,但由于  $C_2Cl_6$ 精炼形成的气泡较大、数量少<sup>[8]</sup>,吸 H 效果并不理想;而高纯氩气喷吹方式是利用设备控制、减小气泡尺寸,可以更好地吸附合金液中的 H,但由于气泡太小,上浮浮力不足,排渣效果略差。因此,使用适当加量的  $C_2Cl_6$ 精炼并配合高纯氩气精炼,熔体净化效果较好。

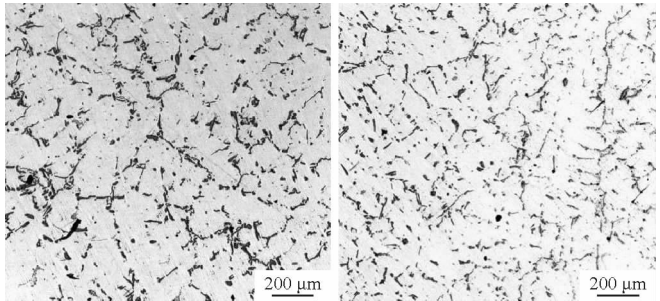


(a)  $C_2Cl_6$ 精炼 (b)  $C_2Cl_6$ (多加 30%)+氩气精炼

图 2 不同精炼工艺下的断口形貌分析

Fig.2 Analysis of fracture morphology under different refining processes

图 3 为 ZL105A 合金添加 0.15% 的 Be 前后的单铸试棒金相组织。表 2 为加 Be 前后的 ZL105A 合金熔体氢含量。可以看出,加 Be 的铝熔体氢含量明显低于不



(a) 无 Be (b)  $w(Be)=0.15\%$

图 3 ZL105A 合金在加 Be 前后的金相组织

Fig.3 Metallographic structure of ZL105A alloy before and after Be addition

加 Be 的,且加 Be 的铝熔体中共晶 Si 更细小,这与 MORTEZA R 等<sup>[9]</sup>的研究结论一致。由于熔体中 Fe 的存在,Be 与 Fe 形成 Be-Fe 析出相,该相的结晶温度高于共晶 Si 结晶温度,在凝固过程中作为共晶 Si 的形核核心,产生一定的共晶 Si 细化效果。同时,由于 Be 的存在,其会先一步与 O 结合,形成体积增加的 BeO,封闭包括合金流动时产生的新生表面等所有外露表面的氧化膜裂纹,减缓合金液氧化速度,减少熔体吸 H,改善了合金内部纯净度。

表 2 加 Be 前后 Be 的 ZL105A 合金铝液中的氢含量

Tab.2 Hydrogen content in ZL105A alloy aluminum melt

| with and without Be addition |             | μg/g |
|------------------------------|-------------|------|
| w(Be)=0                      | w(Be)=0.15% |      |
| 0.20                         | 0.12        |      |

3.2 铸造工艺设计及数值模拟

摇臂壳体铸件局部存在热节区域,因此在热节处下方均设置内浇道,避免补缩不足造成内部缩松。由于铸件高度仅为 160 mm、宽度为 80 mm,立面平均壁厚仅为 4 mm,综合考虑造型、开箱的易操作性和补缩有效性,用砂型造型,采用底注式+缝隙式浇注系统,低压铸造方式成形(见图 4)。

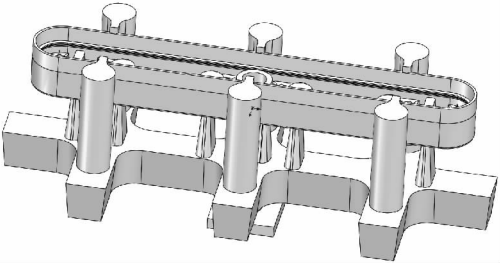


图 4 摇臂壳体浇注系统设计示意图

Fig.4 Schematic diagram of the gating system design for the rocker arm shell

采用 ProCAST 模拟软件,对摇臂壳体铸件的铸造过程进行模拟计算,浇注工艺参数见表 3。

表 3 浇注工艺参数

Tab.3 Casting process parameters

| 升液速度/<br>(mm·s <sup>-1</sup> ) | 充型速度/<br>(mm·s <sup>-1</sup> ) | 升液压<br>力/kPa | 充型压<br>力/kPa | 结壳<br>时间/s | 保压压<br>力/kPa | 浇注温<br>度/℃ |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------|--------------|------------|--------------|------------|
| 50                             | 50                             | 25           | 50           | 1 200      | 75           | 710        |

图 5 和图 6 分别为摇臂壳体凝固过程中的温度场和固相率。可以看出,铝液充型后在凝固过程中摇臂壳体铸件温度梯度分布合理,最后凝固的区域集中在底部浇注系统上,这样可保证铸件顺序凝固,可获得较好的组织及较高的力学性能。

图 7 为根据 Niyama 判据判断缩松可能出现的位置。模拟结果显示,该工艺条件下,热节部位均得到了有效补缩,铸件整体无缩松。图 8 为模拟充型过程中铝液的压力分布与传递情况。可以看出,低压充型时铝液

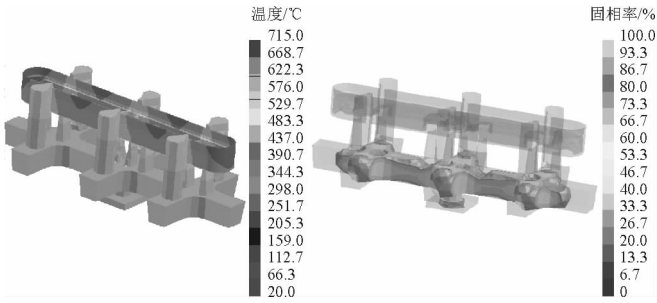


图 5 摇臂壳体凝固过程中的温度场

Fig.5 Temperature field of the rocker arm shell casting during the solidification

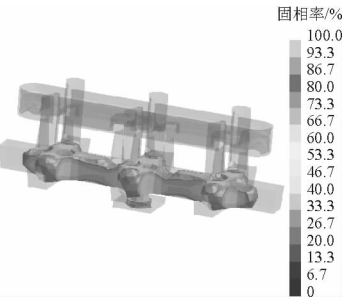


图 6 摇臂壳体凝固过程中的固相率

Fig.6 Solid fraction of the rocker arm shell casting during the solidification

压力从下至上,逐渐降低,建立了良好的顺序凝固压力梯度,可以实现铸件的有效补缩。

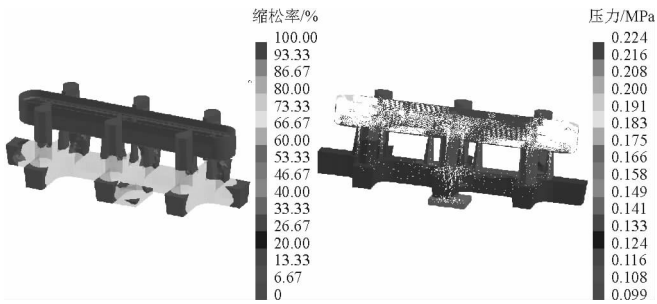


图 7 摇臂壳体凝固过程中的缩松率

Fig.7 Shrinkage rate of the rocker arm shell casting during the solidification

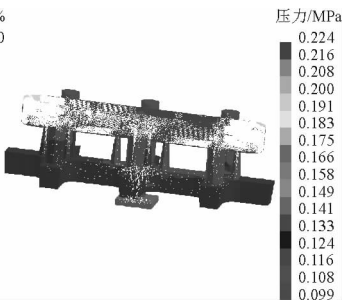


图 8 摇臂壳体浇注过程中的压力分布

Fig.8 Pressure distribution during the casting process of the rocker arm shell

综合以上模拟结果可以看出,摇臂壳体铸件的浇注工艺设计合理。此外,为进一步保障实际生产过程中的铸件内部品质,采取在厚大部位设置随形冷铁(冷铁厚度为 10 mm,见图 9 中深色区域),加快激冷;同时,在横浇道与内浇道交汇处设置过滤网,降低铸件夹杂。

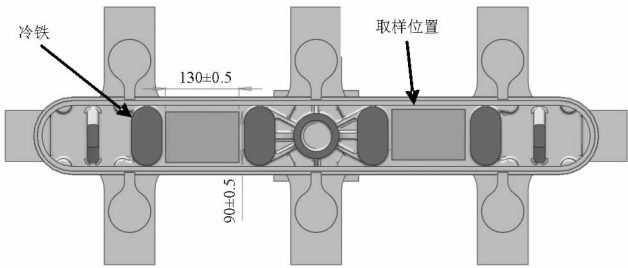


图 9 冷铁布置与本体切取位置示意图

Fig.9 Schematic diagram of chilled iron layout and sampling position of ontology

4 生产验证

按上述工艺生产摇臂壳体铸件,铸件实物见图 10。经 X 光检测,铸件内部未发现缩松缺陷,这与 Pro-CAST 模拟计算结果一致;铸件未发现针孔和夹杂,内

部品质符合 GB/T 9438-2008 I 类铸件要求,实现了一次试制成功。采用三坐标测试平台对摇臂壳体进行尺寸检验,所有尺寸均合格。对铸件进行解剖,摇臂壳体铸件本体取样力学性能与疲劳性能见表 4,均满足技术指标要求。本体切取试样的拉伸断口见图 11,可以看



图 10 合格的摇臂壳体铸件

Fig.10 Qualified rocker arm shell casting

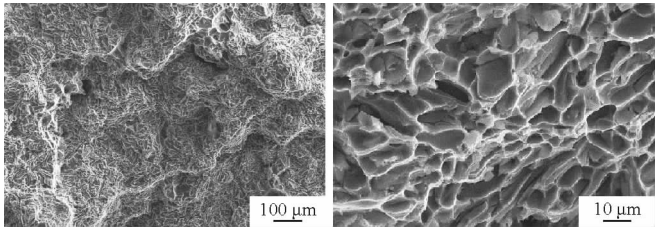
表 4 铸件本体取样的力学性能与疲劳寿命

Tab.4 Mechanical properties and fatigue life of ontology sampling casting

| 试样号 | $\sigma_b$ /MPa | $\sigma_{0.2}$ /MPa | $\delta_5$ /% | 循环次数 $N_f$ /次 |
|-----|-----------------|---------------------|---------------|---------------|
| 1   | 310             | 255                 | 4.7           | 1 010 398     |
| 2   | 312             | 253                 | 4.9           | 1 001 406     |
| 3   | 318             | 261                 | 5.6           | 1 005 047     |
| 4   | 314             | 256                 | 4.2           | —             |
| 5   | 320             | 249                 | 4.6           | —             |

出,整个断面存在大量的撕裂棱,断口呈现较多的韧窝和小解理面,韧窝数量较多,且深度较深,呈韧性断裂与解理断裂的混合断裂特征。断口未见明显缩松、气孔等缺陷,整体塑性较好。

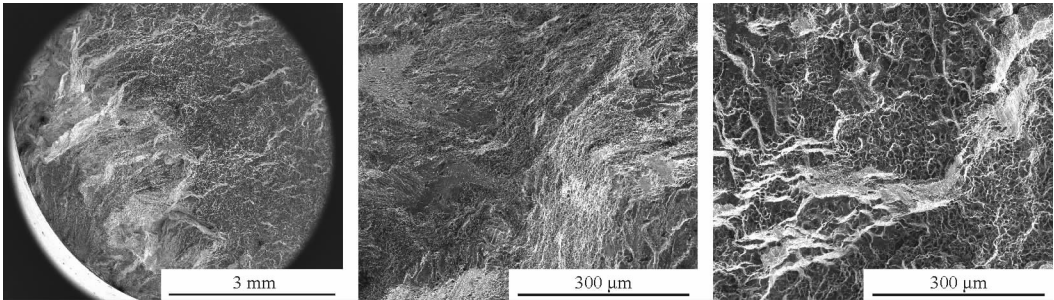
图 12 为摇臂壳体本体疲劳试样断口形貌。可以看出,裂纹源在近表面(裂纹源处未观察到氧化物、缩松、针孔等缺陷,裂纹源或始于试棒加工应力集中部分),裂纹萌生和扩展区占整个断口的比例较大(近 40%),表现出良好的疲劳性能。在裂纹扩展区发现一些光亮的平面,可能是裂纹扩展过程中上、下平面相互磨损造成的。在瞬断区可以看到大量的撕裂棱与细小韧窝,呈以塑性断裂为主的混合解理断裂特征,表现出良好的塑性,这与拉伸断口的特征一致。



(a) 低倍 (b) 高倍

图 11 铸件本体拉伸断口形貌

Fig.11 Tensile fracture morphology of casting ontology



(a) 断口全貌 (b) 扩展区 (c) 瞬断区

图 12 铸件的本体疲劳断口组织

Fig.12 Fatigue fracture morphology of casting ontology

5 结 论

(1)ZL105A 合金通过复合精炼和添加 Be 处理后,ZL105A 合金摇臂壳体铸件本体取样性能:抗拉强度为 318 MPa,屈服强度为 261 MPa,伸长率为 5.6%,疲劳寿命大于  $10^7$  次,铸件表现出良好的综合性能。

(2)基于 ProCAST 模拟计算结果,采用砂型+低压铸造工艺,配合底注式+缝隙式浇注工艺,生产出内部品质合格的 ZL105A 合金摇臂壳体铸件。

参 考 文 献

[1] 严陆光,徐善纲,孙广生,等. 高速磁悬浮列车的战略进展与我国的发展战略[J].电工电能新技术,2002,21(4):1-8.  
[2] 郑来苏.铸造合金及其熔炼[M].西安:西北工业大学出版社,1994.  
[3] 何毅,杨湘杰,方立高,等. A356 合金半固态挤压铸造数值模拟及模具优化[J].特种铸造及有色合金 2017,37(2):160-162.

[4] 陈宇强,张文涛,张浩,等. T616 处理对 Al-Si-Mg-Cu 铸铝时效析出及疲劳行为的影响[J].材料导报,2020,34(14):14 122-14 128.  
[5] TAN L J, ZABRARAS N. A thermomechanical study of the effects of mold topography on the solidification of aluminum alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2005, A404: 197-207.  
[6] 王仪玖.表面张力在铸造过程中的作用[J].江西冶金,2002(2):10-13.  
[7] 杨曼云,孙希平.铸件凝固过程数值模拟影响因素研究[J].机电产品开发与创新,2010(2):86-88.  
[8] AMMAR H R, SAMUEL A M, SAMUEL F H. Porosity and the fatigue behavior of hypoeutectic and hypereutectic aluminum-silicon casting alloys[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30: 1 024-1 035.  
[9] MORTEZA R, MOSTAFA K, MASOUD E, et al. Effects of Be additions on microstructure, hardness and tensile properties of A380 aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(11): 3 539-3 545.

(编辑:栗万仲)