

板栅连铸过程函数模型的建立

冯 军<sup>1</sup> 毕瑜瑜<sup>2</sup>

(1.中国船舶集团衡远科技有限公司研发中心; 2.中国船舶集团衡远科技有限公司模具备件事业部)

**摘 要** 以板栅连铸设备为研究对象,通过对板栅连铸过程的热量传递分析,依据热力学第一定律(能量守恒)建立了板栅连铸过程函数模型,并结合板栅连铸设备实际运行参数对板栅连铸过程函数进行简化;以国内外板栅连铸设备实际运行参数为例,分别计算了板栅连铸设备能够保持稳定运行的理论速度,并将此理论速度与实际速度进行对比分析,得到理论速度与实际速度的相对误差分别为1.8%和4.3%,满足工程需要。

**关键词** 板栅连铸;热量传递;热力学第一定律;过程函数

**中图分类号** TG249.7      **文献标志码** A

**DOI:**10.15980/j.tzzz.2022.01.004      **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Construction of Constitutive Model for Continuous Casting Process of Plate Grids

Feng Jun<sup>1</sup>, Bi Yuyu<sup>2</sup>

(1.Research and Development Center of CSSC Hengyuan Technology Co., Ltd.;  
2.Mould Spare Parts Division of CSSC Hengyuan Technology Co., Ltd.)

**Abstract:** Taking continuous casting grid equipment as the research object, through the analysis of heat transfer process of continuous casting grid, continuous casting grid process function model was established based on the first law of thermodynamics(energy conservation), and the function of continuous casting process was simplified combining with the actual operation parameters of continuous casting grid equipment on the sheeting. Taking the actual operating parameters of domestic and foreign continuous casting grid equipment as an example, the theoretical speeds that can maintain stable operation of domestic and foreign continuous casting grid equipment were calculated, respectively, which were subsequently compared with the actual speeds. The relative errors between the theoretical speed and the actual speed are 1.8% and 4.3%, respectively, meeting the requirement of the project. Herein, the established function model of the continuous casting grid process has a certain guiding significance for the stable production and automatic control of the continuous casting grid equipment.

**Key Words:** Continuous Casting Grid, Heat Transfer, the First Law of Thermodynamics, Process Function

**收稿日期:**2021-07-10;**修改稿收到日期:**2021-08-20  
**第一作者简介:**冯军,男,1988年出生,工程师,重庆(404000),E-mail:fengjun\_hykj@163.com  
**通信作者:**毕瑜瑜,女,1988年出生,工程师,重庆(40400),E-mail:fengjun\_hyke@163.com  
**引用格式:**冯军,毕瑜瑜.板栅连铸过程函数模型的建立[J].特种铸造及有色合金,2022,42(1):18-21.  
FENG J, BI Y Y. Construction of constitutive model for continuous casting process of plate grids[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(1):18-21.

[8] 倪俊杰. 高抗蚀性烧结 NdFeB 制备与性能研究[D].杭州:浙江大学, 2011.

[9] 丁霞. 烧结 NdFeB 永磁合金的微观组织、性能和耐蚀工艺研究[D]. 济南:山东大学, 2016.

[10] HERBST J F, CROAT J J, PINKERTON F E, et al. Relationships between crystal structure and magnetic properties in Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B[J]. Phys. Rev., 1984, B29: 4 176-4 178.

[11] GIVORD D, LIU H S, MOREAU J M. Magnetic properties and crystal structure of Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B[J]. Solid State Commun., 1984, 50: 497-499.

[12] SHOEMAKER C B, SHOEMAKER D P, FRUCHART R. The structure of a new magnetic phase related to the sigma phase: Iron Neodymium boride Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B[J]. Acta Cryst., 1984, C40: 1 665-1 668.

[13] 严飞, 冯海波. 烧结 Nd-Fe-B 磁体充磁特性研究[J]. 金属功能材料, 2020, 27(3): 61-64.

[14] 李岩峰, 赖彬, 朱明刚, 等. 烧结 NdFeB 磁体边界相的调控技术机制[J]. 稀有金属, 2015, 39(11): 988-992.

[15] 崔熙贵. 烧结 Nd-Fe-B 永磁材料显微结构优化与性能研究[D].杭州:浙江大学, 2009.

[16] 张大同. 扫描电镜与能谱仪分析技术[M].广州:华南理工大学出版社, 2009.

[17] GB/T 17359-2012, 微束分析-能谱法定量分析[S].

[18] 赵鸿飞.X 射线能谱精确定量技术的研究[D]. 天津:天津大学, 2007.

[19] FU X, HAN X L, DU Z W, et al. Microstructural investigation of Nd-rich phase in sintered Nd-Fe-B magnets through electron microscopy[J]. Journal of Rare Earths, 2013, 31(8): 765-771.

(编辑:刘晨辉)

板栅连铸设备是将恒温铅合金液通过铅泵传输至连铸定模,随后连铸定模将恒温铅合金液均匀分配于连铸动模表面的型腔内冷却凝固形成所需尺寸的板栅。板栅连铸设备作为高效、节能的铅酸蓄电池板栅生产装备,备受铅酸蓄电池行业的关注。

近年来,研究者对连铸设备进行了大量的研究。许琳等<sup>[1]</sup>利用 ANSYS CFX 软件对薄板坯连铸结晶器内流动和液面的波动行为进行了仿真分析研究,结果表明,考虑液面变形和波动的仿真分析结果更具有实际意义。纪振平等<sup>[2]</sup>提出了一种连铸坯表面温度集成建模方法,并且通过铸机的实际测试数据对建立的模型进行验证,发现所建立的模型能够满足在线应用。刘中秋等<sup>[3]</sup>通过改变连铸运行参数,对结晶器表面渣眼的形成进行了水模型研究,发现拉速、吹气量、渣层厚度的变化对渣眼的形成有一定的影响。李万全等<sup>[4]</sup>设计了一种板栅连铸机并生产出了连铸板栅的样品。于百业等<sup>[5]</sup>对板栅连铸设备的动模主轴可靠性进行仿真分析,得到了板栅连铸定模主轴的可靠度为 99.41%。CATTANEO E 等<sup>[6]</sup>通过改变铅锑合金的成分以及板栅连铸设备的参数来达到连铸设备能够生产铅酸蓄电池正板栅的目的。

由于对板栅连铸过程本构模型的研究报道较少,所以本课题对板栅连铸实际过程做了相关研究,建立了板栅连铸过程本构模型,为实现板栅连铸设备的连续稳定运行以及全自动控制提供参考。

1 板栅连铸主要设备组成

传统的板栅铸造设备由于生产效率低、能耗高而逐步被板栅连续生产设备所代替,板栅连铸设备就是其中之一。板栅连铸设备主要组成见图 1。高温铅液泵将

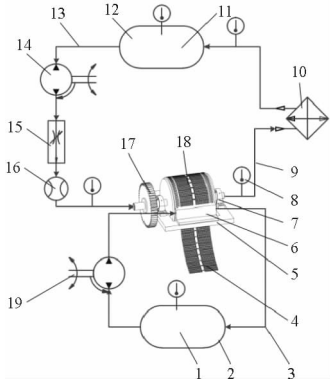


图 1 板栅连铸主要设备组成

Fig.1 The main equipment of plate grid for continuous casting

- 1.恒温铅钙合金熔液 2.熔铅炉 3.回铅管路 4.连铸板栅
- 5.模具安装座 6.连铸定模 7.安装轴承 8.温度传感器
- 9.回油管路 10.热交换器 11.恒温冷却油 12.循环油箱
- 13.进油管路 14.循环油泵 15.流量控制阀 16.流量计
- 17.驱动齿轮 18.连铸动模 19.恒温铅液系

恒温铅钙合金液从熔铅炉传输至连铸定模,连铸定模将恒温铅钙合金液均匀浇注于连铸动模型腔。在恒温循环冷却油的作用下,铅钙合金液在型腔内冷却凝固形成特定尺寸的连铸板栅。

2 板栅连铸用合金的选择

用于生产铅酸蓄电池板栅的铅钙合金按照 Ca 含量分为低钙合金(0.02%~0.04%的 Ca)、中钙合金(0.06%~0.10%的 Ca)和高钙合金(0.10%~0.15%的 Ca),中钙合金的凝固区间狭窄,适合用于铅酸蓄电池负板栅的连续铸造。

为了使得研究更贴近实际,根据铅钙合金体系的平衡相图<sup>[7]</sup>,选用某公司实际应用的中钙合金来研究板栅连铸生产过程本构模型,中钙合金主要成分见表 1。

表 1 某公司实际使用的中钙合金主要成分  
Tab.1 The main composition of medium calcium alloy used by a company

| used by a company |         |       |          |          |          | %  |
|-------------------|---------|-------|----------|----------|----------|----|
| $\omega_B$        |         |       |          |          |          |    |
| Ca                | Al      | Sn    | Bi       | Cu       | Ni       | Pb |
| 0.092             | 0.007 1 | 0.026 | 0.000 26 | 0.000 20 | 0.000 21 | 余量 |

3 板栅连铸过程函数模型的建立

3.1 板栅连铸过程热量的传导过程分析

结晶器在连铸生产中起着十分重要的作用<sup>[8~10]</sup>。板栅连铸结晶器是由连铸定模和连铸动模组成,见图 2。

板栅连铸结晶器在工作当中,连铸动模以一定的速度滚转,连铸定模固定于模具安装座上面,连铸动模连续稳定地吸收着由连铸定模分配于其型腔的恒温铅合金液的热量  $Q$ 。热量  $Q$  被连铸动模内部的恒温循环冷却油吸收之后分别以  $Q_{oi}$  和  $Q_{dg}$  传导散热,过程见图 3。

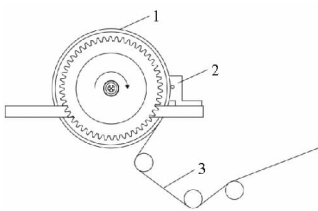


图 2 板栅连铸结晶器  
工作过程

Fig.2 Working process of crystallizer for grid continuous casting

- 1.连铸动模 2.连铸定模 3.连铸板栅

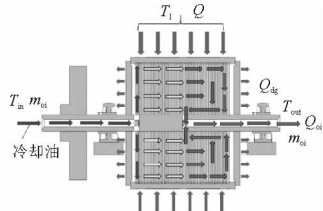


图 3 板栅连铸动模内部  
传热过程

Fig.3 Internal heat transfer process of drum for grid continuous casting

3.2 板栅连铸凝固坯壳的放热计算

连铸板栅在凝固为一定厚度坯壳的过程中需要放

出一定的热量  $Q$ , 为了便于计算凝固板栅坯壳所放出的热量, 需要对连铸板栅进行简化处理, 实际凝固成形的板栅坯壳中间呈现网格状, 见图 4。由于连铸结晶器在连续浇注冷却的过程中, 连铸定模的内部一直流动着恒温铅合金液, 所以连铸定模的最终温度将和恒温铅合金液的温度相同。而连铸定模的圆弧型面与连铸动模的外筒圆弧面配合接触, 其接触方式与钢铁的连铸结晶器的凝固成形类似, 所以将连铸板栅凝固坯壳简化为铅钙合金平板, 厚度为  $e$ , 见图 5。

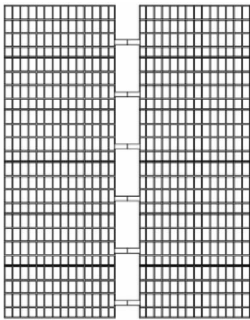


图 4 连铸板栅坯壳  
Fig.4 Grid shell for continuous casting

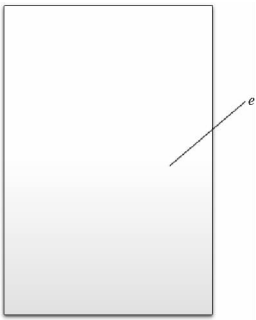


图 5 简化的连铸板栅坯壳  
Fig.5 Simplified grid shell for continuous casting

恒温铅合金液在凝固为一定厚度的连铸板栅坯壳所放出的热量为<sup>[11]</sup>:

$$Q = Lev\rho[c_e(T_c - T_l) + L_f + c_s(T_s - T_0)] \quad (1)$$

式中,  $Q$  为简化的连铸板栅坯壳凝固放出的热量,  $\text{kJ}/\text{min}$ ;  $L$  为连铸动模的有效冷却长度,  $\text{m}$ ;  $e$  为连铸动模的平均板栅凝固厚度,  $\text{m}$ ;  $v$  为连铸动模转动线速度,  $\text{m}/\text{min}$ ;  $\rho$  为铅合金液的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_e$  为铅合金液的比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $c_s$  为固体铅合金锭的比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T_l$  为铅合金液的液相线温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_s$  为铅合金液固相线温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $L_f$  为铅合金液的凝固潜热,  $\text{kJ}/\text{kg}$ ;  $T_0$  为出连铸动模板栅的温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

3.3 连铸动模内部循环冷却油传热计算

连铸板栅凝固放出的热量  $Q$  被连铸动模内部循环冷却油吸收, 以  $Q_{\text{dg}}$  和  $Q_{\text{oi}}$  的方式进行传导散热。由于热量  $Q_{\text{dg}}$  向空气中自然散热, 其表面传热系数较小, 在计算冷却油传热时可以忽略。根据热量吸收公式计算得到连铸动模内部循环冷却油的传热量如下:

$$Q_{\text{oi}} = c_{\text{oi}} m_{\text{oi}} (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (2)$$

式中,  $c_{\text{oi}}$  为冷却油的比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $m_{\text{oi}}$  为通过连铸动模内部的循环冷却油的质量,  $\text{kg}/\text{min}$ ;  $T_{\text{out}}$  为连铸动模出口冷却油的温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{in}}$  为连铸动模进口冷却油的温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

由于在板栅连铸设备设计中, 通过连铸动模内部冷却油量为  $V$  (单位为  $\text{L}/\text{min}$ ), 那么式(2)变形如下:

$$Q_{\text{oi}} = c_{\text{oi}} \rho_{\text{oi}} V (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (3)$$

式中,  $\rho_{\text{oi}}$  为冷却油的密度,  $\text{kg}/\text{L}$ 。

3.4 板栅连铸过程函数模型的建立

根据能量守恒定律建立板栅连铸过程平衡方程如下:

$$Q = Q_{\text{oi}} \quad (4)$$

即:

$$Lev\rho[c_e(T_c - T_l) + L_f + c_s(T_s - T_0)] = c_{\text{oi}} \rho_{\text{oi}} V (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (5)$$

根据板栅连铸设备实际运行情况, 式(5)中的参数  $L$ 、 $\rho$ 、 $c_e$ 、 $c_s$ 、 $T_l$ 、 $T_s$ 、 $L_f$ 、 $T_0$ 、 $c_{\text{oi}}$ 、 $\rho_{\text{oi}}$  是不可在线调整的量, 所以板栅连铸过程函数模型的建立如下:

$$f(e, v, V, T_{\text{out}}, T_{\text{in}}) = Lev\rho[c_e(T_c - T_l) + L_f + c_s(T_s - T_0)] - c_{\text{oi}} \rho_{\text{oi}} V (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (6)$$

以某公司板栅连铸过程实际运行状态为例, 实际运行过程运行参数见表 2。

表 2 板栅连铸过程实际运行参数

| Tab.2 Actual operation parameters of grid during continuous casting process |                                        |                                                            |                        |                        |                                                            |                        |                        |                                                                      |                                                    |                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------|
| $L/\text{m}$                                                                | $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | $c_e/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ | $T_c/^{\circ}\text{C}$ | $T_l/^{\circ}\text{C}$ | $c_s/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ | $T_s/^{\circ}\text{C}$ | $T_0/^{\circ}\text{C}$ | $c_{\text{oi}}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ | $\rho_{\text{oi}}/(\text{kg} \cdot \text{L}^{-1})$ | $L_f/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$ |
| 0.1                                                                         | 11 340                                 | 0.128                                                      | 455                    | 350                    | 0.128                                                      | 325                    | 150                    | 1                                                                    | 0.875                                              | 26.17                                  |

将表 2 中的参数代入式(6)化简得

$$f(e, v, V, T_{\text{out}}, T_{\text{in}}) = 70\ 319.34\ ev - 0.875\ V(T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (7)$$

4 连铸过程函数模型的计算应用

4.1 国内连铸设备稳定生产速度的理论值与实际值对比

国内某公司的板栅连铸设备稳定运行时的实际参数见表 3。

表 3 国内某板栅连铸设备运行的参数

| Tab.3 Operation parameters of a grid equipment for continuous casting in at home |                                      |                                   |                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| $e/\text{m}$                                                                     | $V/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$ | $T_{\text{out}}/^{\circ}\text{C}$ | $T_{\text{in}}/^{\circ}\text{C}$ |
| 0.001                                                                            | 125                                  | 72                                | 60                               |

令

$$f(e, v, V, T_{\text{out}}, T_{\text{in}}) = 70\ 319.34\ ev - 0.875\ V(T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) = 0 \quad (8)$$

将表 3 中的参数代入式(8), 求解得此板栅连铸设备的理论稳定生产速度  $v$  为  $18.66\ \text{m}/\text{min}$ 。而实际的稳定生产速度  $v_{\text{fact}}$  为  $19\ \text{m}/\text{min}$ 。

可见板栅连铸设备理论稳定生产速度与实际稳定生产速度的相对误差为:

$$\beta = \frac{v_{\text{fact}} - v}{v} \times 100\% = 1.8\% \quad (9)$$

4.2 国外连铸设备稳定生产速度的理论值与实际值对比

美国某公司的板栅连铸设备稳定运行时的实际参数见表 4。

表 4 国外某板栅连铸设备运行的参数

Tab.4 Operation parameters of a grid equipment for continuous casting at abroad

| $e/m$   | $V/(L \cdot \min^{-1})$ | $T_{out}/^{\circ}C$ | $T_{in}/^{\circ}C$ |
|---------|-------------------------|---------------------|--------------------|
| 0.000 9 | 167                     | 90                  | 80                 |

将表 4 中的参数代入式(8),求解得此理论稳定生产速度  $v$  为 23.1 m/min,而实际的稳定生产速度  $v_{fact}$  为 24.1 m/min。从而得到板栅连铸设备理论稳定生产速度与实际稳定生产速度的相对误差为 4.3%。

采用建立的板栅连铸过程函数模型对国内外连铸设备理论生产速度进行计算,并与实际生产速度进行对比分析,相对误差都在 5%以内,满足实际工程需要。

5 结 论

(1)通过对板栅连铸设备连铸过程的热量传递分析,根据热力学第一定律(能量守恒)建立了板栅连铸过程函数模型为  $f(e, v, V, T_{out}, T_{in}) = 70\ 319.34\ ev - 0.875\ V(T_{out} - T_{in})$  有关的函数表达式。

(2)将板栅连铸设备的参数代入函数模型进行计算,得到了国内外板栅连铸设备能够保持稳定运行的理论速度分别为 18.66 m/min 和 23.1 m/min。

(3)将理论稳定运行速度与实际稳定运行速度进行对比分析,得到其理论值与实际值得相对误差分别为 1.8% 和 4.3%,满足实际工程需要。

参 考 文 献

[1] 许琳,邓安员,王恩刚.薄板连铸结晶器内流动和液面波动行为的数值模拟[J].特种铸造及有色合金, 2017, 37(1): 30-34.

[2] 纪振平,田珊珊,张兆雄,等.连铸坯表面温度集成建模方法[J].电机与控制学报, 2018, 22(12): 114-120.

[3] 刘中秋,庞世超,李宝宽.吹氩连铸结晶器内渣眼形成的水模型实验[J].材料与冶金学报, 2018, 17(1): 26-31.

[4] 李万全,高长银,刘江,等.蓄电池板栅连铸机研制[J].中国机械工程, 2012, 23(1): 106-108.

[5] 于百业,王志亮,冯勇,等.基于 ANSYS 的板栅连铸机动模主轴可靠性分析[J].机械设计与制造, 2016(2): 244-247.

[6] CATTANEO E, STUMPF H, TILLMANN H G, et al. Continuous casting of lead-antimony alloys[J]. Journal of Power Sources, 1997, 67: 283-286.

[7] 德切柯·巴普洛夫.铅酸蓄电池科学与技术[M].段喜春,苑松译.北京:机械工业出版社, 2015.

[8] 万佳.薄板坯连铸连轧生产 22MnB5 钢的工艺研究[J].河北冶金, 2018(10): 20-24.

[9] 李博斌.连铸工艺对 M2 高速钢碳化物析出的影响[J].河北冶金, 2018(12): 23-27.

[10] 赵志刚,仇圣桃,朱荣.M2 钢连铸过程中碳化物析出行为[J].材料热处理学报, 2016, 37(7): 214-220.

[11] 蔡开科.连铸结晶器[M].北京:冶金工业出版社, 2008.

(编辑:刘卫)

南方科技大学研发新型 3D 打印高强韧铝合金

近日,南方科技大学机械与能源工程系逯文君副教授团队、德国马普钢铁所 Dierk Raabe 教授团队和新加坡制造技术研究院 Sharon Mui Ling Nai 团队在 Materials Today 联合发表论文,报道了一种通过选择性激光熔化(SLM)和热处理技术制造出的具有前所未有的强度-韧性协同作用的无裂纹 7000 系铝合金材料。

研究发现,通过 SLM+热处理工艺,使 AlZnMgCuScZr 铝合金的高强度超过了 647 MPa,这是 SLM 生产的铝合金的高报告值,同时具有约 11.6%的可观延展性。具有可调节分级微观结构的高强度的 Al7000 系列合金的成功制造为设计和微调 SLM 工艺生产高机械载荷作用下的铝合金部件铺平了道路。

为此,南方科技大学逯文君及其合作者提出了一种适用于 SLM 工艺的新型铝合金成分设计:AlZnMgCuScZr,利用热处理工艺对其组织结构进行调控,得到了能同时拥有晶粒多峰异质结构与双析出相结构的微观组织,并最终优化其综合力学性能。

该材料具有结构化的微观结构,由多峰晶粒和复杂的分级相形态组成。它由初级  $Al_3(Sc_x, Zr_{1-x})$  颗粒组成,作为超细晶粒的孕育剂,防止裂纹形成。亚稳态的富镁、锌和铜的二十面体准晶(I 相)普遍分散在晶粒内部,并沿晶界排列为花丝骨架。对所有层级的理解打开了通过调整热处理参数来定制合金机械响应的途径。通过调整后续热处理参数,可促使准晶相溶解到基体中以及后续的时效析出强化型第二相( $\eta'$ )。同时在热处理过程中析出二次的  $Al_3(Sc, Zr)$  纳米颗粒,形成  $\eta'$  和  $Al_3(Sc, Zr)$  双析出相纳米结构。

采用该工艺生产出了一种微观结构变体,该变体结构使合金的屈服强度范围高达  $(647 \pm 6)$  MPa,这是已知的 SLM 生产的铝合金的高值,同时具有很高塑性,伸长率达  $(11.6 \pm 1.5)\%$ 。可调分级微观结构设计策略可用于更广泛的 SLM 生产的 7000 系列 Al 合金,对于轻量化应用具有很大潜力。

(摘自中国有色网)