

# 不同热处理方式对AlSi10Mg点阵结构压缩性能的影响

陈昇声, 张旭

大连交通大学机车车辆工程学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2024年4月29日; 录用日期: 2024年6月20日; 发布日期: 2024年6月30日

## 摘要

本研究针对选择性激光融化制造的AlSi10Mg点阵结构, 系统探讨了不同热处理方式对其微观结构及压缩性能的影响。通过准静态压缩实验评估了压缩性能, 并深入研究了热处理方式与微观结构以及性能之间的相互关系。结果显示, 不同热处理方式对AlSi10Mg的微观结构和压缩性能产生了显著影响, 为后续选择性激光融化制造的AlSi10Mg合金的力学性能和微观结构研究提供了重要参考。特别值得注意的是, 经过实验验证, 最佳的热处理工艺为525°C-2 h-空冷 + 180°C-6 h-空冷。

## 关键词

热处理工艺, AlSi10Mg, 点阵结构, 压缩性能

# The Influence of Different Heat Treatment Methods on the Compressive Performance of AlSi10Mg Lattice Structure

Shengsheng Chen, Xu Zhang

College of Locomotive and Rolling Stock Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning

Received: Apr. 29<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jun. 20<sup>th</sup>, 2024; published: Jun. 30<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

This study focuses on the AlSi10Mg lattice structure manufactured by selective laser melting, and systematically explores the effects of different heat treatment methods on its microstructure and compression performance. The compression performance was evaluated through quasi-static

compression experiments, and the relationship between heat treatment methods, microstructure, and performance was thoroughly studied. The results showed that different heat treatment methods had a significant impact on the microstructure and compressive properties of AlSi10Mg, providing important references for the mechanical properties and microstructure research of Al-Si10Mg alloys manufactured by selective laser melting in the future. Of particular note, after experimental verification, the optimal heat treatment process is 525°C-2 h-air cooling + 180°C-6 h-air cooling.

## Keywords

Heat Treatment Process, AlSi10Mg, Lattice Structure, Compression Performance

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

当今社会面临着严峻的环境和能源挑战,因此,环境友好型材料成为各行各业的选择,轻量化发展也成为普遍目标,钛合金、不锈钢、镍合金和铝合金等轻量化材料备受关注。其中,AlSi10Mg合金因其良好的性能在生物医学、交通运输和航空航天等领域得到广泛应用。同时为实现结构轻量化,常采用高强度、轻量化材料和特殊结构替代传统实体结构[1][2]。点阵结构因其形状可控、高比强度和吸能减振等特点,成为轻量化设计的主要方法。通过桁架单胞的构型和几何尺寸设计,去除零部件多余部分,实现内部中空化,从而达到轻量化目的。此外,除了轻量化外,合金的性能也至关重要,而合金性能则与合金内部微观结构存在紧密联系。为获得可以适应多种场合的AlSi10Mg合金,则可以通过热处理可改变合金内部的微观结构和析出相的分布,进而提高其AlSi10Mg合金强度和韧性。在进行热处理时,所选用的工艺和参数对于最终合金的性能具有至关重要的影响,包括但不限于加热温度、保温时间以及冷却速度等方面[2][3]。此外,由于点阵结构一般比较复杂,多采用选择性激光融化(SLM)的方法制造研究。

目前,有关热处理的研究人员主要在不同的热处理方式和热处理的温度的拉伸性能等进行了研究。Park等[4]人对SLM制成的AlSi10Mg拉伸试件的只进行人工时效处理。发现其与原件一样,仍然具有熔池结构和细胞结构。Han[5]等人对AlSi10Mg拉伸试件进行2小时的550°C固溶处理后发现热处理会降低合金的抗拉强度,同时由于晶粒生长和残余应力的释放使合金的延展性获得提高。Casati[6]等人发现标准的T6热处理,导致了拉伸试件更高的延展性,但机械强度较低。Ahn[7]等人对SLM制造的AlSi10Mg合金进行了不同温度(200°C, 260°C, 320°C)的人工时效处理,发现处理后的合金表现出出色的强度和延展性组合,归因于其细小的细胞结构和纳米级的针状沉淀物。由此可见多数的研究主要集中在AlSi10Mg的拉伸试件的热处理方式和温度与拉伸性能的相关研究。

然而,对于不同热处理方式对AlSi10Mg的压缩性能的系统研究却相对较少,而不同的热处理方式对铝合金的微观结构和力学性能产生很大的影响[8][9]。为了更好地了解不同热处理方式对AlSi10Mg压缩性能的影响,则有必要设定通过不同的热处理组合以掌握热处理过程中热处理方式对AlSi10Mg点阵结构的微观结构和压缩性能的影响。

因此,本文主要关注的是不同热处理方式对选择性激光融化制造的AlSi10Mg点阵结构的微观结构及其压缩性能的影响。通过准静态压缩实验评估其压缩性能,同时讨论了不同热处理方式对微观结构以

及压缩性能的相关性, 为后续的选择性激光融化制造的 AlSi10Mg 合金的力学性能和微观结构等相关研究提供一定的参考价值。

## 2. 实验材料与方法

### 2.1. 材料和制造

本文研究所使用的 AlSi10Mg 粉末化学成分如表 1 所示。选择性激光融化过程是在一台配备了 Yb 光纤激光器的 EOS 280 3D 打印机上进行的(最大功率, 400 W; 激光束直径, 100  $\mu\text{m}$ )。由于所有的样品试件都是在空气中制作, 为防止在制造过程中, 氧气与铝或镁反应导致样品试件的脆化, 所以使用氩气将氧气的浓度控制在 0.6% 以下。在使用打印机时所采用的激光功率为 300 W, 扫描速度为 1000 mm/s, 层厚为 30  $\mu\text{m}$ , 舱口间距为 120  $\mu\text{m}$ , 处理参数见表 2。

**Table 1.** Chemical composition of AlSi10Mg powder (wt%)

**表 1.** AlSi10Mg 粉末的化学成分(wt%)

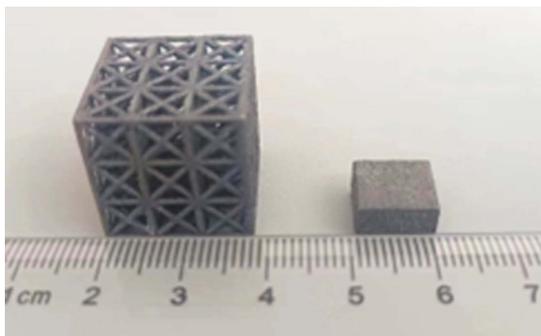
元素	Si	Mg	Fe	Zn	Cu	Ni	Ti	Al
占比	10.068	0.292	0.135	0.06	0.045	0.03	0.005	Bal.

**Table 2.** Processing parameters for selective laser melting

**表 2.** 选择性激光融化的处理参数

参数	激光功率(W)	扫描速度(mm/s)	舱口间距( $\mu\text{m}$ )	层厚( $\mu\text{m}$ )
数值	300	1000	120	30

本次研究所使用的压缩试件是由  $3 \times 3$  的单元组成的一个边长为 18 mm 的面心立方点阵结构(FCCZ), 其中每个单元结构是由水平( $0^\circ$ )、对角线( $45^\circ$ )和垂直( $90^\circ$ )这三个不同方向的圆形支杆组成, 圆杆粗细为 0.35 mm, 单元边长为 6 mm, 而使用的实体块尺寸为 10 mm  $\times$  5 mm  $\times$  10 mm, 建筑方向为 z 轴方向, 如图 1 所示。



**Figure 1.** Lattice structure and solid blocks of AlSi10Mg alloy

**图 1.** AlSi10Mg 合金点阵结构及实体块

### 2.2. 热处理工艺

对通过选择性激光融化制备的 AlSi10Mg 试件进行不同的热处理, 处理过程详细如表 3 所示, 旨在探究不同处理方式对合金微观结构和点阵结构的压缩性能的影响。主要采用了固溶处理(SHT)、人工时效处理(AA)和固溶处理 + 人工时效处理(SHA)。固溶处理阶段, 试件被加热至 525  $^\circ\text{C}$ , 以使合金元素溶解

于固态溶剂中。而在人工时效处理阶段, 试件被加热至 180℃, 以促进析出相的形成和生长, 从而提升材料的性能。冷却方式的冷却速度由快到慢依次为制冷剂冷却, 空冷和炉冷。同时, 在热处理过程中, 采用氩气防止试件氧化, 以确保热处理的有效性和准确性。

**Table 3.** Detailed heat treatment procedures  
**表 3.** 详细的热处理程序

热处理方式	热处理时间	冷却方式
人工时效处理(AA, 180℃)	6 h	制冷剂冷却, 空冷, 炉冷
	4 h, 6 h, 8 h	空冷
固溶处理(SHT, 525℃)	2 h	空冷
	1 h, 2 h, 3 h	制冷剂冷却, 空冷, 炉冷
固溶处理 + 人工时效处理(SHA, SHT + 180℃)	4 h, 6 h, 8 h	空冷

### 2.3. 微观表征方法和机械实验

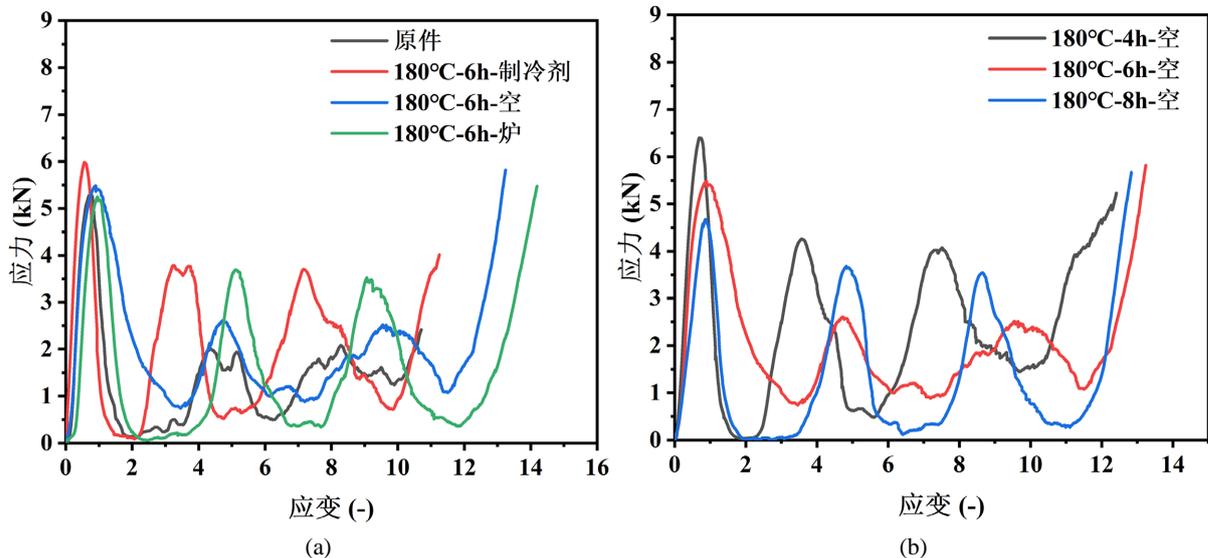
为了深入了解不同热处理方式对试件力学性能的影响, 采用了 SHIMADZU 通用试验机进行了点阵结构压缩试验。这些试验在室温下进行, 使用 10 kN 的力进行施加, 试验参数按照 ISO 13314:2011 设置。压缩试验的速度为 1 mm/min, 通过这些试验获得的拉伸和压缩数据被用来绘制力 - 位移图, 以反映不同试件的压缩性能。此外, 通过扫描电子显微镜观察不同热处理方式的样品的表面微观特征, 扫描电子显微镜是一种高分辨率的表面成像技术, 广泛用于材料科学、生物学和其他领域的研究。扫描电子显微镜是利用电子束与样品表面相互作用, 产生二次电子、反射电子和透射电子等信号, 以获取样品表面的形貌和微观结构信息。扫描电子显微镜具有更高的分辨率和深度成像能力, 可观察到更小尺寸和更复杂的表面结构。在观察过程中, 将样品置于真空室中, 施加电子束于样品表面, 激发电子信号产生, 并通过电子束在样品表面的扫描来获取高分辨率图像。通过扫描电子显微镜可对材料微观结构、表面形貌、晶体结构、纳米颗粒等进行详细观察。通过电子显微镜对样品的微观结构进行观察以分析样品压缩性能与微观结构之间的关系。

### 3. 实验结果

本文通过准静态压缩试验研究不同冷却方式对压缩性能的影响。在压缩过程中, 样品主要经历了弹性变形阶段、波动阶段和密集化阶段, 根据压缩数据绘制了力 - 位移曲线, 如图 2 所示。从图中可以观察到所有压缩图中都存在多个峰值, 这表明在压缩的过程中, 样品是逐层破坏的。样品的晶格结构能够吸收能量, 其吸能的能力通常通过最大压溃峰值力(Peak Crushing Force, PCF)和比吸能(Specific Energy Absorption, SEA)等参数来表征[9]。

图 2(a)为原件和不同冷却方式的人工时效的样品的压缩曲线图, 从图中可以观察到, 这些样品表现出了明显的三个压溃峰值, 原件的最大压溃峰值力为 5.299 kN。与原件相比, 人工时效处理使样品的最大压溃峰值力提高。在相同的热处理时间下, 当冷却速度升高时, 样品的最大压溃峰值力提高越多同时曲线的波动性也更大, 其中 180℃-6 h-制冷剂冷却的压溃峰值力最大, 而另外两种冷却方式, 由于冷却速度相对较慢, 压溃峰值力略有下降。图 2(b)为不同热处理时间的人工时效处理的样品的压溃曲线图, 从图中可以观察到, 在相同的冷却方式下, 热处理时间的增加会使样品的最大压溃峰值力下降。然而, 由于人工时效只能提高样品的最大压溃峰值力却无法提高延展性, 所以由于样品的低延展性, 原件及所有

仅进行人工时效处理的样品在压缩过程中出现了压溃现象, 即在压缩完成后, 样品除了主体部分外, 还有很多由于脆性断裂而脱落的碎块, 如图 3 所示, 这种脆性断裂现象在实际应用中无法有效地缓冲冲击或应力, 因此不存在有效的比吸能, 且具有较大的安全隐患。



**Figure 2.** Compression Curve of AlSi10Mg Lattice Structure with Artificial Aging Treatment. (a) Artificial aging treatment samples with different cooling methods; (b) Artificial aging treated samples with different heat treatment times

**图 2.** 人工时效处理的 AlSi10Mg 点阵结构的压缩曲线。(a) 不同冷却方式的人工时效处理样品; (b) 不同热处理时间的人工时效处理样品



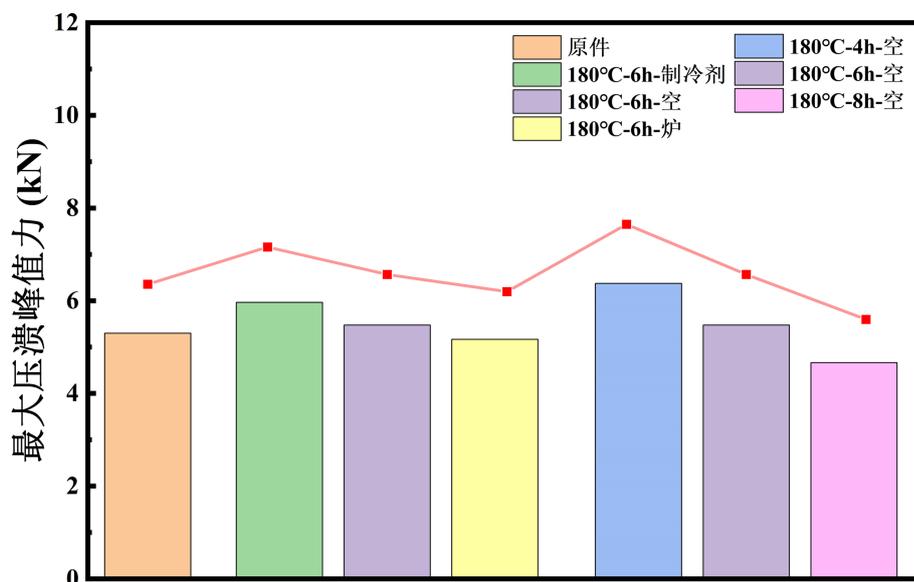
**Figure 3.** Compression process of original and artificially aged samples

**图 3.** 原件及人工时效的样品的压缩过程

为了更加直观的了解不同冷却方式和热处理时间的人工时效处理对 AlSi10Mg 点阵结构的影响, 如图 4 所示。从图 4 中可以看出随着冷却速度的降低和热处理时间的增加, 点阵结构的最大压溃峰值力下降, 且相对于冷却速度的影响, 时间对样品最大压溃峰值力的影响更大。不同人工时效处理的点阵结构的最大压溃峰值力及与原件相比的变化幅度如表 4 所示。

图 5 为固溶处理的样品的压缩曲线, 其中图 5(a) 为不同冷却方式的固溶处理的点阵结构的压缩曲线。从图中可以发现固溶处理后, 相对于人工时效处理的压缩曲线, 固溶处理的压缩曲线波动性更小, 且点阵结构的最大压溃峰值力显著下降。在相同的热处理时间下, 当冷却速度的降低, 样品的压溃峰值力也相应降低。图 5(b) 为不同热处理时间的固溶处理的点阵结构的压缩曲线, 从图中可以发现随着当冷却速度相同时, 当热处时间增加时, 样品的最大压溃峰值力也下降。

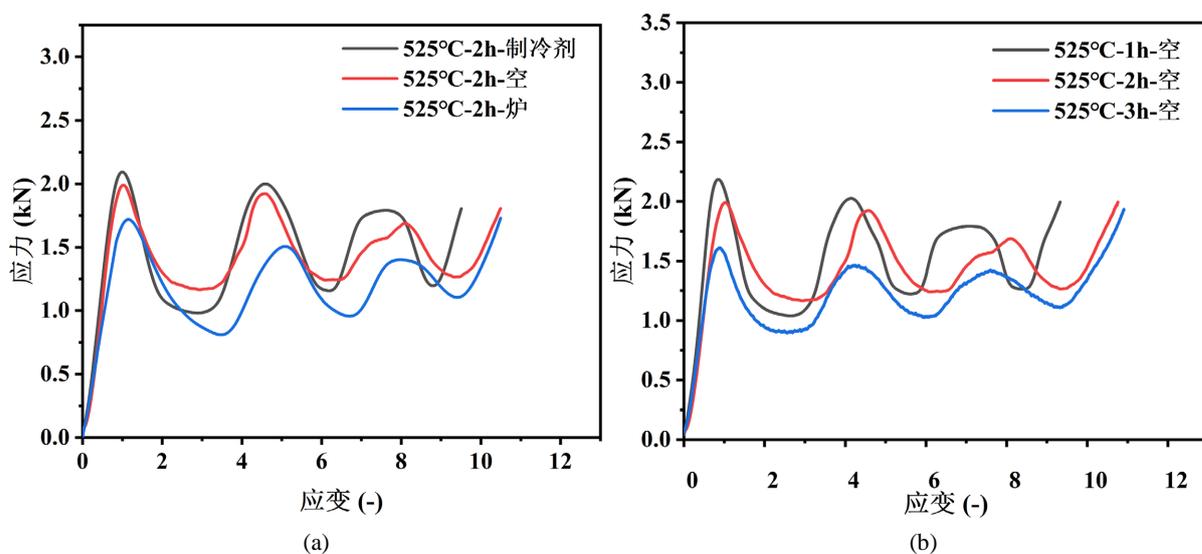
基于上述实验可以发现热处理时间对 AlSi10Mg 点阵结构的压缩性能的影响大于冷却速度, 故固溶处理 + 人工时效则采用在  $525^{\circ}\text{C} + 2\text{h} +$  空冷的固溶处理的基础上进行不同热处理时间的人工时效处理的方法, 其压缩曲线如图 6 所示。从图 6 中可以发现, 后续的人工时效使样品的最大压溃峰值力上升, 但在相同的冷却速度下, 热处理时间对点阵结构的最大压溃峰值力的影响降低。此外, 由于固溶处理和固溶



**Figure 4.** Maximum crushing peak force of artificially aged samples with different cooling methods and heat treatment times  
**图 4.** 不同冷却方式和不同热处理时间的人工时效样品最大压溃峰值力

**Table 4.** Specific values of maximum crushing peak force of samples subjected to different artificial aging treatments  
**表 4.** 不同人工时效处理的样品最大压溃峰值力具体数值

样品	最大压溃峰值力(kN)	样品	最大压溃峰值力(kN)
原件	5.299 (1)	180°C-8 h-空	4.663 (-12.01%)
180°C-4 h-空	6.376 (+20.32%)	180°C-6 h-制冷剂	5.967 (+12.61%)
180°C-6 h-空	5.474 (+3.3%)	180°C-6 h-炉	5.166 (-2.51%)



**Figure 5.** Compression curve of AlSi10Mg lattice structure treated with solid solution. (a) Solid solution treated samples with different cooling methods; (b) Solid solution treated samples with different heat treatment times

**图 5.** 固溶处理的 AlSi10Mg 点阵结构的压缩曲线。(a) 不同冷却方式的固溶处理样品；(b) 不同热处理时间的固溶处理样品

处理 + 人工时效处理的温度较高, 虽然样品的压溃峰值力下降但延展性获得巨大的提高, 所以这些样品的压缩过程如图 7 所示, 在整个过程中未出现如人工时效一样的压溃现象, 即固溶处理和固溶处理 + 人工时效处理可以使样品有效的吸收能量。

图 8 中展示了不同固溶处理和固溶处理 + 人工时效处理的点阵结构的最大压溃峰值力。从图中可以

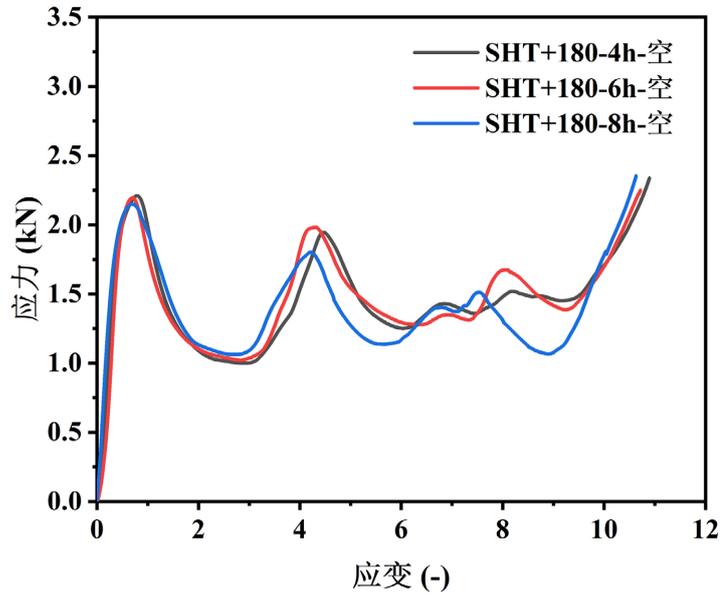


Figure 6. Compression curves of samples treated with solid solution and artificial aging at different heat treatment times

图 6. 不同热处理时间的固溶处理 + 人工时效处理的样品压缩曲线

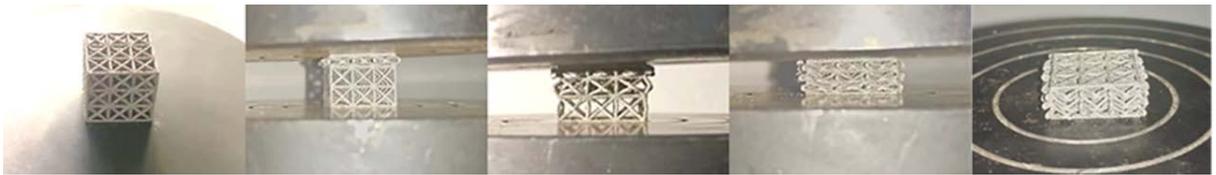


Figure 7. Compression process of solid solution treated samples

图 7. 固溶处理的样品的压缩过程

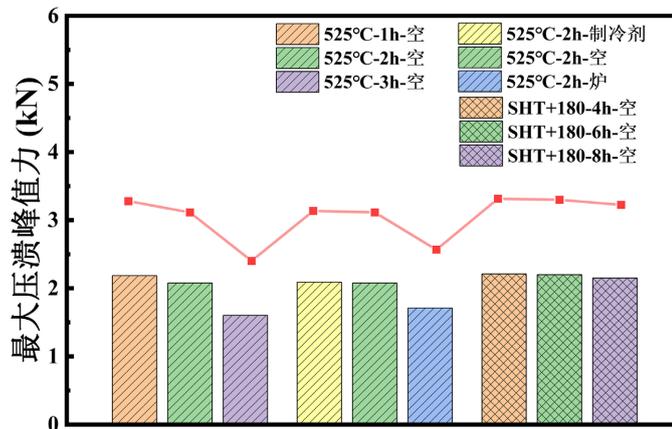


Figure 8. Maximum crushing peak force of samples subjected to different solid solution treatments and solid solution treatments + artificial aging treatment

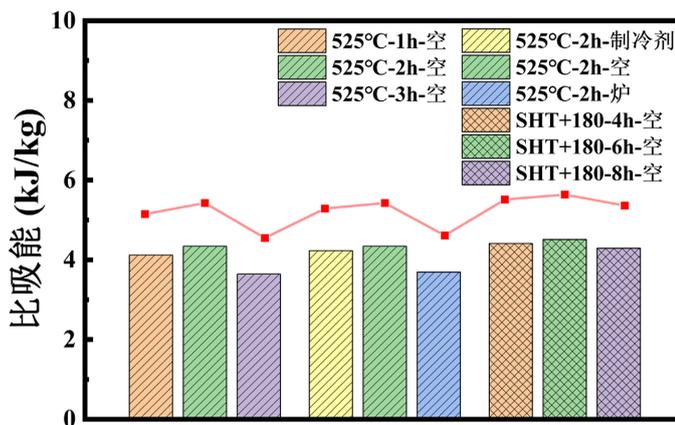
图 8. 不同固溶处理和固溶处理 + 人工时效处理的样品最大压溃峰值力

发现, 对于固溶处理阶段, 当热处理时间增加和冷却速度降低时, 点阵结构的最大压溃峰值力相应降低且趋势明显, 变化趋势与仅人工时效处理的样品一致。而对于后续的人工时效处理, 虽然同样表现出热处理时间的增加最大压溃峰值力下降, 但变化趋势不明显, 表面热处理时间对样品的影响降低。

除了最大压溃峰值力外, 比吸能也是评估点阵结构压缩性能的重要参数之一, 其计算公式如公式(1)所示[10]。

$$SEA = \frac{\int_0^{\delta} F(X) dx}{M} \quad (1)$$

式中  $M$  为样品的质量, 而  $\int_0^{\delta} F(X) dx$  为晶格结构样品在压缩变形过程中所吸收的总能量, 可以通过压缩曲线下的面积来计算。不同固溶处理和固溶处理 + 人工时效处理的样品比吸能如图 9 所示。从图中可以观察到, 对于固溶处理阶段, 随着热处理时间的增加和冷却速度的降低, 样品的比吸能都表现出先增加后降低的趋势。而对于后续的不同热处理时间的人工时效, 随着热处理时间的增加, 样品的比吸能也表现出先增加后降低的趋势, 但变化幅度也相较于固溶处理阶段低。所有固溶处理和固溶处理 + 人工时效处理的点阵结构的最大压溃峰值力和比吸能的具体数值及与原件相比的变化幅度如表 5 所示, 比吸



**Figure 9.** Specific energy absorption of samples treated with different solid solution treatments and solid solution treatments + artificial aging treatment

**图 9.** 不同固溶处理和固溶处理+人工时效处理的样品的比吸能

**Table 5.** Specific values of maximum crushing peak force and specific energy absorption for samples treated with solid solution and solid solution + artificial aging

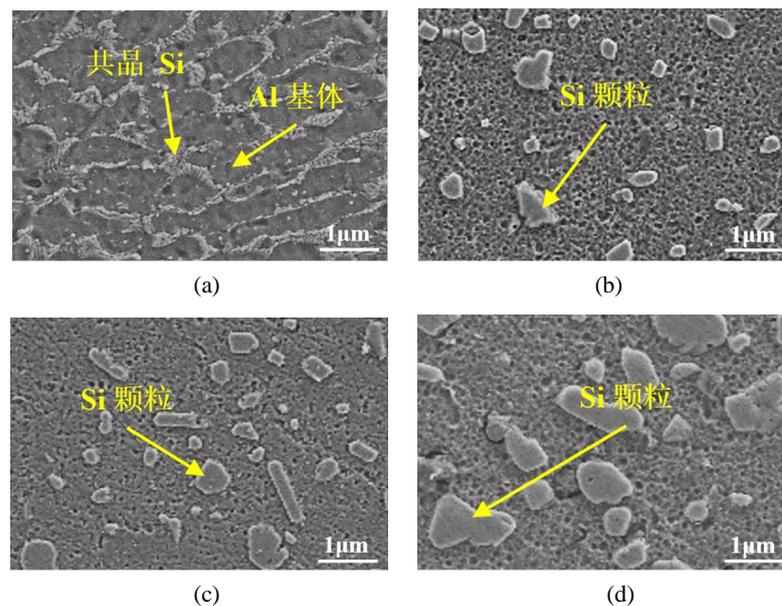
**表 5.** 固溶处理和固溶处理+人工时效处理的样品的最大压溃峰值力和比吸能的具体数值

样品	最大压溃峰值力(kN)	比吸能(kJ/kg)
525°C-1 h-空	2.186 (-58.75%)	4.12 (-5.07%)
525°C-2 h-空	2.076 (-60.82%)	4.34 (1)
525°C-3 h-空	1.601 (-69.79%)	3.64 (-16.13%)
525°C-2 h-制冷剂	2.091 (-60.54%)	4.23 (-2.53%)
525°C-2 h-炉	1.711 (-67.71%)	3.69 (-14.98%)
SHT + 180°C-4 h-空	2.21 (-58.29%)	4.41 (+1.61%)
SHT + 180°C-6 h-空	2.2 (-58.48%)	4.51 (+3.92%)
SHT + 180°C-8 h-空	2.15 (-59.43%)	4.29 (-1.16%)

能则以 525°C-2 h-空冷为参考。可见就 AlSi10Mg 点阵结构的压缩性能而言,最佳的热处理工艺为 525°C-2 h-空冷 + 180°C-6 h-空冷。

#### 4. 讨论

为了解不同热处理方式对样品的微观结构的影响,通过扫描电子显微镜分别对不同冷却速度和不同热处理时间的样品进行观察,由于人工时效未能改变点阵结构在压缩过程中的脆性断裂,故对不同冷却方式的观察为固溶处理的样品,如图 10 所示。在图 10(a)为未经过热处理的原件,可以清晰地看到主要由细长的细胞状  $\alpha$ -Al 基体和非常细的树枝状共晶 Si 网络组成。这种结构形态是由于在选择性激光融化制造的过程中,AlSi10Mg 的冷却速度较高,导致 Si 相颗粒仅在  $\alpha$ -Al 基体细胞的边界处有少量析出。在图 10(b)~(d)中展示了经过 525°C-2 h-不同冷却方式的样品的扫描电镜图片。观察到随着冷却速度的降低,样品中 Si 相颗粒的析出逐渐增多,分布也逐渐趋于均匀,同时颗粒的尺寸也逐渐增大,这表明了低冷却速度使得 Si 相有更充分的时间来析出并形成更大的颗粒,从而影响了合金的力学性能和微观结构特征。析出颗粒尺寸随冷却速度的降低依次为 1.08  $\mu\text{m}$ , 1.26  $\mu\text{m}$  和 1.46  $\mu\text{m}$ 。

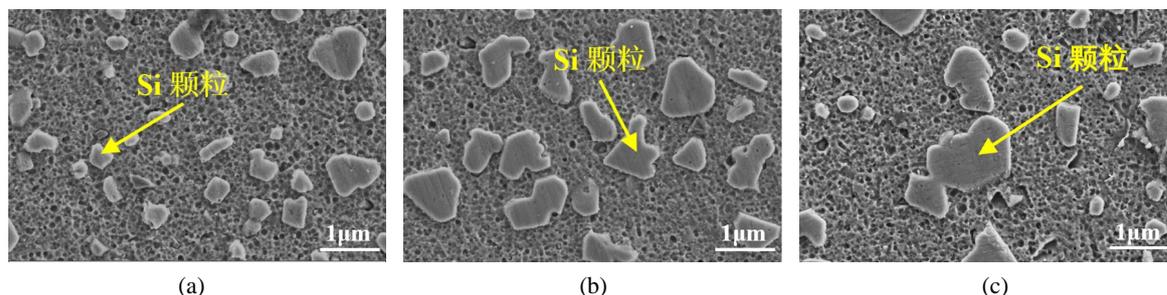


**Figure 10.** Surface microstructure characteristics of the original component and samples treated with different cooling methods through solid solution treatment. (a) Original; (b) 525°C-2 h-refrigerant; (c) 525°C-2 h-air; (d) 525°C-2 h-furnace

**图 10.** 原件及不同冷却方式的固溶处理的样品的表面微观特征。(a) 原件; (b) 525°C-2 h-制冷剂; (c) 525°C-2 h-空; (d) 525°C-2 h-炉

在图 11 中,图 11(a)为 525°C 的固溶处理 2 h 后,接着进行 180°C 的人工时效 4 h 的样品,可以观察到相比于 525°C-2 h-空冷样品,析出量进一步增加,Si 颗粒的尺寸也进一步变大,其平均尺寸为 1.69  $\mu\text{m}$ 。图 11(b)为 6 h 的人工时效处理后的样品,可以观察到更多大尺寸的 Si 相颗粒析出,其平均尺寸达到 2.07  $\mu\text{m}$ 。图 11(c)为经过 8 h 人工时效处理后的样品,主要为大尺寸析出物,与 6 h 的样品相比,其尺寸变化不大,平均尺寸为 2.10  $\mu\text{m}$ 。发现随着人工时效处理时间的增加,Si 相颗粒的析出量和尺寸逐渐增加。在较短的人工时效处理时间内,Si 相颗粒的尺寸有显著增加,且数量增多。然而,随着时间的进一步延长,Si 相颗粒的尺寸增长趋势变得缓慢,尺寸的变化不大。这可能是因为在较短的时效处理时间内,基体内的 Si 元素为完全析出,因此尺寸增长较为明显。而随着时间的增加,Si 等元素几乎完全析出,导致了尺

寸增长速度的减缓。



**Figure 11.** Surface microscopic characteristics of solid solution treatment and artificial aging treatment samples with different heat treatment times. (a) SHT + 180°C-4 h-air; (b) SHT + 180°C-6 h-air; (c) SHT + 180°C-8 h-air

**图 11.** 不同热处理时间的固溶处理 + 人工时效处理的样品的表面微观特征。(a) SHT + 180°C-4 h-空; (b) SHT + 180°C-6 h-空; (c) SHT + 180°C-8 h-空

通过上述观察,可以发现点阵结构的压缩性能与材料内部析出颗粒尺寸,数量以及分布密切相关。原件在选择性激光融化制造过程中经历了极高的冷却速度,这种高速冷却导致了样品内部 Si 颗粒之间的距离极小,并形成了树枝状共晶 Si 网络。这一网络结构正是样品的最大压溃峰值力高但延展性较差的主要原因之一。随着固溶处理的进行,Al 基体中的 Si 相析出量也随之增多,导致了树枝状共晶 Si 网络逐渐演变成为独立分布的相对较大尺寸 Si 颗粒,从而使 Si 颗粒之间的距离增大,这使样品的延展性有效提高,但与此同时也会导致试件的强度降低,也使压缩过程中的脆性断裂消失。而后续的人工时效处理使得样品内部的 Si 相析出进一步增加,这也是使得样品最大压溃峰值力进一步提高,而随着热处理时间的继续增加,相邻的 Si 相颗粒相融导致颗粒数量减少。

当冷却速度相同时,随着热处理时间的增加,样品的最大压溃峰值力也相应降低,这种现象可以通过霍尔-佩奇效应进行解释,霍尔-佩奇效应的所提供的强化效果可以用公式(2)表示。

$$\sigma = \sigma_0 + K_{H-P} * d^{-1/2} \quad (2)$$

式中的  $\sigma$  是材料的抗拉强度,  $\sigma_0$  是无晶界的抗拉强度,  $K_{H-P}$  是材料的霍尔-佩奇系数,  $d$  是晶粒尺寸,由此可见当  $d$  越小时,强化效果越好。原始样品在制造过程中由于快速冷却,样品的平均晶粒尺寸小,所以其强度也就高。而在后续的热处理中,由于热处理温度和热处理时间的增加,样品内部的晶粒具有了生长条件,除了析出量增加外,样品的平均晶粒尺寸也相应增加,故导致霍尔-佩奇效应提供的强化效果降低,也就导致样品的最大压溃峰值力随着热处理时间的增加而降低。

## 5. 结论

在本文的研究中,系统地研究了不同热处理方式对选择性激光融化制造的 AlSi10Mg 样品的析出相和压缩性能的影响,有助于优化工艺、指导材料设计,提高材料性能,并促进理论研究。通过调控热处理参数,可以精确控制材料的微观结构和力学性能,实现定制化材料设计,满足特定工程需求,推动材料科学领域的发展。

同时可以得到以下结论:

1) 固溶处理明显改善了 AlSi10Mg 点阵结构的压缩性能,降低了最大压溃峰值力,并减少了曲线波动性。人工时效处理提高了峰值力,但影响较小,无法显著改善稳定性和韧性。热处理时间增加和冷却速度降低,不论处理方式,样品的性能趋势一致。

2) 制造过程中由于高速冷却形成的树枝状共晶 Si 网络导致了样品的高压溃峰值力和较差的延展性。

固溶处理使结构转变为独立分布的 Si 相颗粒, 随着时间的增加和冷却速度的降低, Si 相颗粒逐渐增多并独立分布, 提高了延展性但降低了强度, 消除了脆性断裂。人工时效进一步增加 Si 相析出, 提高了最大压溃峰值力。合适的热处理工艺可以提高结构的比吸能, 最佳的热处理工艺为 525°C-2 h-空冷 + 180°C-6 h-空冷。

## 基金项目

大连市科技创新基金应用基础研究项目(2022JJ12GX029); 辽宁省科技计划项目(编号: LJKZ0493)。

## 参考文献

- [1] Li, D., Qin, R., Xu, J., Chen, B. and Niu, X. (2022) Effect of Heat Treatment on AlSi10Mg Lattice Structure Manufactured by Selective Laser Melting: Microstructure Evolution and Compression Properties. *Materials Characterization*, **187**, Article 111882. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.111882>
- [2] Kleiner, S., Zürcher, J., Bauer, O. and Margraf, P. (2020) Heat Treatment Response of Selectively Laser Melted Al-Si10Mg. *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*, **75**, 113-127. <https://doi.org/10.3139/105.110418>
- [3] Bao, J., Wu, Z., Wu, S., Hu, D., Sun, W. and Wang, R. (2022) The Role of Defects on Tensile Deformation and Fracture Mechanisms of AM AlSi10Mg Alloy at Room Temperature and 250°C. *Engineering Fracture Mechanics*, **261**, Article 108215. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.108215>
- [4] Park, T., Baek, M., Hyer, H., Sohn, Y. and Lee, K. (2021) Effect of Direct Aging on the Microstructure and Tensile Properties of AlSi10Mg Alloy Manufactured by Selective Laser Melting Process. *Materials Characterization*, **176**, Article 111113. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111113>
- [5] Han, Q. and Jiao, Y. (2019) Effect of Heat Treatment and Laser Surface Remelting on AlSi10Mg Alloy Fabricated by Selective Laser Melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **102**, 3315-3324. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-03272-y>
- [6] Casati, R., Hamidi Nasab, M., Coduri, M., Tirelli, V. and Vedani, M. (2018) Effects of Platform Pre-Heating and Thermal-Treatment Strategies on Properties of AlSi10Mg Alloy Processed by Selective Laser Melting. *Metals*, **8**, Article 954. <https://doi.org/10.3390/met8110954>
- [7] Ahn, S.Y., Moon, J., Choi, Y.T., Kim, E.S., Jeong, S.G., Park, J.M., et al. (2022) A Precipitation-Hardened AlSi10Mg Alloy Fabricated Using Selective Laser Melting. *Materials Science and Engineering: A*, **844**, Article 143164. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143164>
- [8] Li, Z., Nie, Y., Liu, B., Kuai, Z., Zhao, M. and Liu, F. (2020) Mechanical Properties of AlSi10Mg Lattice Structures Fabricated by Selective Laser Melting. *Materials & Design*, **192**, Article 108709. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108709>
- [9] Liu, M., Takata, N., Suzuki, A. and Kobashi, M. (2020) Effect of Heat Treatment on Gradient Microstructure of Al-Si10Mg Lattice Structure Manufactured by Laser Powder Bed Fusion. *Materials*, **13**, Article 2487. <https://doi.org/10.3390/ma13112487>
- [10] Khan, H.M., Dirikolu, M.H. and Koç, E. (2019) Weibull Distribution of Selective Laser Melted AlSi10Mg Parts for Compression Testing. *Proceedings of AMC Turkey 2019 Conference*, Turkey, 17-18 October 2019.