

基于正交试验的 6063 铝型材挤压成形工艺参数优化

库国辉

贵州梅岭电源有限公司, 贵州 遵义 563000

[摘要] 这篇文章以压块为例, 对挤压过程的变形机理及工艺参数优化配比展开研究。压块作为固定幕墙与玻璃托的连接件, 其质量的好坏直接影响玻璃的安全可靠性, 而在压块的成形工艺中, 金属材料内部晶粒尺寸的变化直接影响着压块的质量。为此, 文章通过将有限元数值模拟分析方法与塑性成形理论相结合, 以压块晶粒尺寸细化为目的, 对挤压成形过程中的几个主要工艺参数进行优化, 从而制定出最佳的工艺参数配比组合, 为工厂的实际生产提供参考。

[关键词] 挤压成形; 工艺参数; DEFORM-3D; 数值模拟

DOI: 10.33142/sca.v4i6.5069

中图分类号: TG381

文献标识码: A

Optimization of Extrusion Process Parameters of 6063 Aluminum Profile Based on Orthogonal Test

KU Guohui

Guizhou Meiling Power Supply Co., Ltd., Zunyi, Guizhou, 563003, China

Abstract: Taking the briquette as an example, this paper studies the deformation mechanism and the optimal ratio of process parameters in the extrusion process. As the connector between fixed curtain wall and glass support, the quality of pressing block directly affects the safety and reliability of glass. In the forming process of pressing block, the change of internal grain size of metal material directly affects the quality of pressing block. Therefore, by combining the finite element numerical simulation analysis method with the plastic forming theory, in order to refine the grain size of the briquette, this paper optimizes several main process parameters in the extrusion process, so as to formulate the best ratio combination of process parameters, and provide reference for the actual production of the factory.

Keywords: extrusion forming; process parameters; DEFORM-3D; numerical simulation

热挤压主要是利用金属材料在热锻温度下塑性较高的特点, 把坯料挤压成人们所需要各种形状和尺寸的零件^[1]。生产过程中因为工艺的复杂性产品质量一直存在很多的问题, 影响了企业的经济效益和长远发展^[2]。在挤压生产工艺流程中, 发现工艺参数对产品质量有非常大的影响, 为此将优化好的工艺参数运用到工厂中, 对实际生产有着重要意义。

1 有限元模型的建立

现以压块(如图 1)为例进行对此研究。压块作为固定幕墙与玻璃托的连接件, 其质量的好坏直接影响玻璃的安全可靠性, 经调研发现工艺参数是影响压块质量缺陷的主要因素, 在挤压生产流程中影响挤压的工艺参数主要有挤压力、挤压比、铝棒的化学成分、挤压筒温、模具工作带、挤压温度、挤压速度等。本文选取铝棒的化学成分、挤压温度、挤压速度、挤压筒温和模具的预热温度五个工艺参数进行优化分析, 研究成形过程中工艺参数对压块内部结构晶粒尺寸变化的影响。

DEFORM-3D 有限元仿真软件可以通过对材料的设置、边界条件的设置以及对摩擦和接触的运算研究而进行仿真分析, 在进行 DEFORM-3D 软件前处理设置时, 首先进入前处理模式, 设置模拟环境, 通常以国际单位为准, 其次把新建好的名称保存到新建目录里, 然后把已经画好的三维模型导入软件中, 有限元模型如图 2 所示, 最后进行前处理的设置界面, 模拟工艺参数设置如表 1 所示。

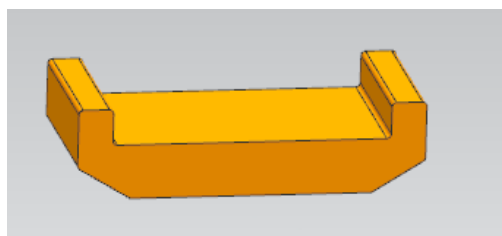


图 1 压块三维模型

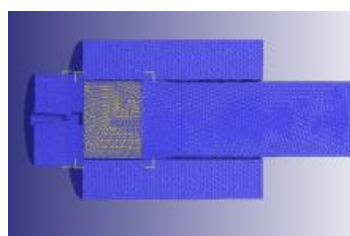


图 2 有限元模型

表 1 模拟工艺参数

模拟参数选项设定	设定值
模具	AISI-H-13
材料	AL6063
热传导系数 (N/sec/mm/°C)	5
挤压温度 (°C)	520
挤压速度 (m/min)	20
模具预热温度 (°C)	470
挤压筒温 (°C)	455

根据压块挤压成形的特点，为研究挤压过程中的开始挤压阶段、基本挤压阶段和终了挤压阶段晶粒尺寸的变化，在受等效应变最大且晶粒近似相等处，选取两个点作为跟踪整个挤压流程的追踪点，如图 3 所示。

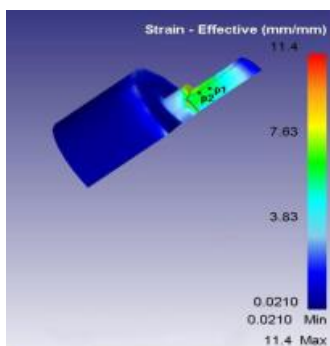


图 3 等效应变云图

2 挤压成形过程的数值模拟分析

2.1 开始挤压阶段

坯料受挤压杆的推动作用，金属开始径向流动，充满了模具的整个型腔开始发生形变，与此同时，受到挤压区域金属内部微观组织也发生了变化^[3]。开始挤压阶段晶粒尺寸的演化过程，是从一开始晶粒大小近似相等的两个追踪点晶粒尺寸的变化基本相同，但又有其不同之处。主要是因为挤压杆推力的作用下，坯料开始发生形变，应变值增加，同时位错密度也开始变大，当应变值大于某一临界值时，随着位错密度的逐渐变大达到了动态再结晶的临界点时，形成晶核。通过外力的作用，应变量的不断变化，会给动态再结晶创造条件，导致产生晶核的数量会越来越多，从而会形成新的晶粒而使制品整体晶粒的尺寸减小。

2.2 基本挤压阶段

挤压成形继续进行，开始进入基本挤压阶段，此时，金属从模孔流出，坯料发生大的变形，应变不断增大，位错密度也随之不断地变化，晶粒的尺寸也会发生变化^[4]。由于新形成的晶粒位错密度为零，原晶粒与动态再结晶所形成的晶粒间存在位错密度差，这正是新晶粒长大的驱动力，在此期间，新晶粒逐渐变大，当驱动力减小为零时，新晶粒也就停止生长了。同时新晶粒在生长的过程中接触其他的新晶粒时，它们所接触的边界部分就会停止生长，而当坯料继续受挤压，变形量加大，位错密度大于再结晶的临界值时，会再次形成晶核，新的晶粒又开始形成、长大。这两个阶段反复地进行着，致使晶粒的尺寸有所变化，两个追踪点平均晶粒尺寸分别为 113.37 μm 和 112.23 μm ，与开始挤压阶段相比，晶粒的数量明显增多了，而且均匀了很多。

2.3 终了挤压阶段

追踪终了挤压阶段晶粒的变化，两个追踪点平均晶粒为 90.31 μm ，90.98 μm ，由于此阶段金属发生剧烈的横向流动，变形量随之加大，发生再结晶的速度要比前两个阶段大的多，各点处的晶粒得到了不同程度的细化。纵观压块挤压的全过程，会发现，压块在挤压过程中应变越大，晶粒会越细小。

3 压成形工艺参数的优化分析

3.1 压成形关键因素与水平的确定

通过 DEFORM-3D 塑性成形数值模拟分析与实际生产情况与 DEFORM-3D 塑性成形数值模拟分析可知，在成形过程中的晶粒度变化受铝棒的化学成分（镁硅配比）、挤压温度、挤压速度、挤压筒温和模具预热温度的影响最为主要，故选取这五个因素作为实验因素，根据每个因素的取值范围，选取四个不同的水平，如表 2 所示。

表 2 正交试验水平表

水平 \ 因素	A/(mg:si)	B/°C	C/(m/min)	D/°C	E/°C
1	1.2:1	520	15	440	470
2	1.3:1	535	20	455	485
3	1.4:1	550	25	470	500
4	1.5:1	565	30	485	515

注：A-铝棒的化学成分（镁硅配比）；B-挤压温度；C-挤压速度；D-挤压筒温；E-模具预热温度。

3.2 试验方案结果

正交表对整个试验方案来说尤为重要，合理安排正交表是实施试验方案的关键^[5]。为使试验设计方案中的所有因素 and 所有水平均出现在表中，根据表 1 所选取的因素数和水平数选取了五因素四水平正交试验表，表达式为 $L_{16}(4^5)$ ，其中，16 表示试验方案的总次数，5 表示试验因素数，4 表示所选取的水平数。通过 DEFORM-3D 软件对正交表的 16 组试验进行模拟，得到晶粒尺寸的模拟结果如表 3 所示。

表 3 试验方案结果表

组号 \ 列号	A/(mg:si)	B/°C	C/(m/min)	D/°C	E/°C	F/μm
1	1.2:1	520	15	440	470	111.2
2	1.2:1	535	20	455	485	107.4
3	1.2:1	550	25	470	500	108.31
4	1.2:1	565	30	485	515	110.5
5	1.3:1	520	20	470	500	98.9
6	1.3:1	535	15	485	515	102.1
7	1.3:1	550	30	440	470	99.3
8	1.3:1	565	25	455	485	105.2
9	1.4:1	520	25	485	515	93.5
10	1.4:1	535	30	470	500	95.8
11	1.4:1	550	15	455	485	101.1
12	1.4:1	565	20	440	470	99.7
13	1.5:1	520	30	455	485	83.8
14	1.5:1	535	25	440	470	82.6
15	1.5:1	550	20	485	515	84.5
16	1.5:1	565	15	470	500	86.8

注：A-铝棒的化学成分（镁硅配比）；B-挤压温度；C-挤压速度；D-挤压筒温；E-模具预热温度；F-晶粒尺寸。

3.3 试验结果分析

试验结果的分析方法主要有极差分析法和方差分析法，下面将根据这两种分析方法依次对试验方案结果（如表 3）进行挤压工艺参数的优化分析。

3.3.1 极差分析

以晶粒尺寸为试验指标来计算各因素极差值的大小，首先结合表 4 直观地观察每个因素的各个水平所对应的晶粒尺寸大小，然后计算各因素各水平所对应晶粒大小的平均值，最后把求得各因素的极差值列入表 4 中。

表 4 极差分析

	A/(mg:si)	B/°C	C/(m/min)	D/°C	E/°C
均值 1	109.37	96.86	100.32	98.22	99.19
均值 2	101.39	96.99	97.65	99.39	96.77
均值 3	97.55	98.32	97.41	97.47	98.49
均值 4	84.45	100.58	97.37	97.68	98.29
极差	24.93	3.72	2.95	1.93	2.42
优水平	A4	B1	C4	D3	E2

注：A-铝棒的化学成分（镁硅配比）；B-挤压温度；C-挤压速度；D-挤压筒温；E-模具预热温度。

极差值反映了各因素对试验指标的幅度波动,极差值越大,则说明该因素对试验指标的影响越主要^[8]。由表4可以看出每个因素对应极差值的大小,从而确定影响因素的主次关系为:铝棒的化学成分(镁硅配比)>挤压温度>挤压速度>模具预热温度>挤压筒温。为直观地观察各因素对试验指标的影响,依据表2和表4以各因素各水平所对应晶粒尺寸的平均值作为纵坐标,各因素的水平数作为横坐标,绘制各因素与晶粒尺寸的关系如图4所示。

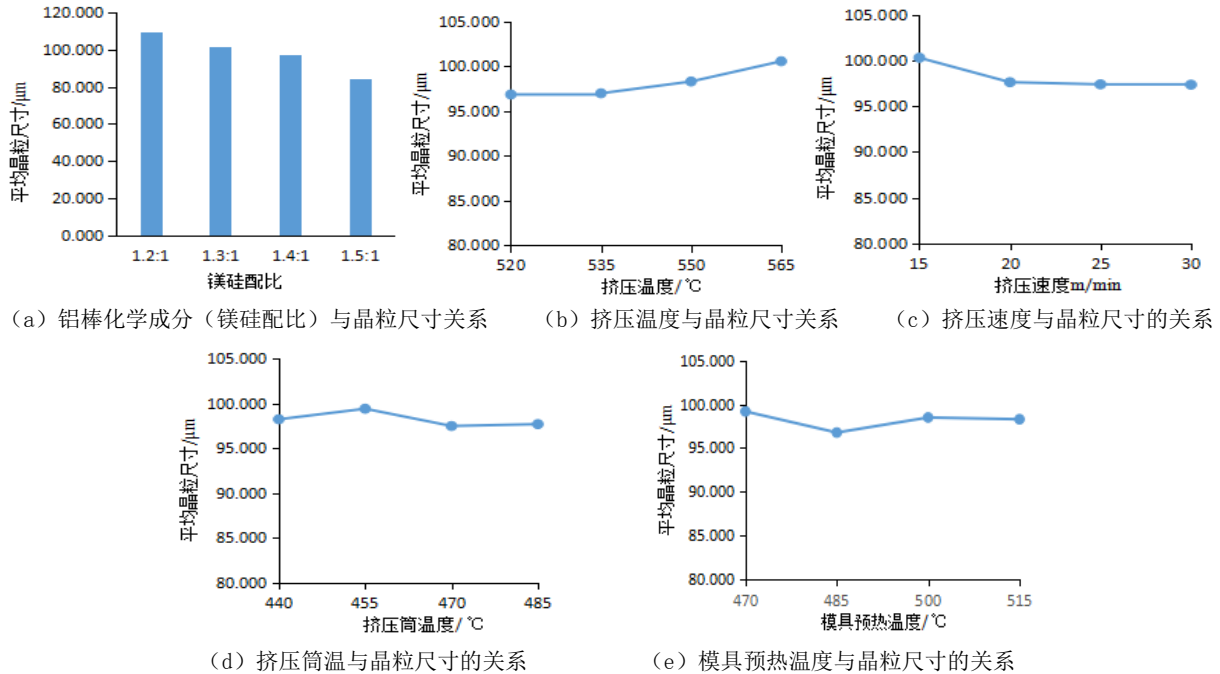


图4 试验因素对试验指标(晶粒尺寸)的影响

挤压过程中各工艺参数对晶粒尺寸的变化关系,在铝棒的化学成分(镁硅配比)取值为1.2:1至1.5:1之间时,镁硅配比为1.2:1处的平均晶粒尺寸为 $109.370\mu\text{m}$,随着镁硅配比的增加, Mg_2Si 强化相不断增强,在镁硅配比为1.3:1、1.4:1、1.5:1处平均晶粒尺寸分别为 $101.390\mu\text{m}$ 、 $97.545\mu\text{m}$ 、 $84.445\mu\text{m}$,从这里可以看出,当铝棒的化学成分(镁硅配比)在1.5:1处时的平均晶粒尺寸最小。当挤压温度为 520°C 时,平均晶粒尺寸最小为 $96.862\mu\text{m}$,由于挤压温度的不断增大,促使坯料内部能量的增高,从而驱动了晶粒的生长,故挤压温度在 535°C 、 550°C 、 565°C 时的平均晶粒尺寸分别为 $96.995\mu\text{m}$ 、 $98.315\mu\text{m}$ 、 $100.578\mu\text{m}$ 。在所取挤压速度为 $15\text{m}/\text{min}$ 、 $20\text{m}/\text{min}$ 、 $25\text{m}/\text{min}$ 、 $30\text{m}/\text{min}$ 时,平均晶粒尺寸分别为 $100.322\mu\text{m}$ 、 $97.645\mu\text{m}$ 、 $97.410\mu\text{m}$ 、 $97.373\mu\text{m}$,从而可以看出,在挤压速度为 $30\text{m}/\text{min}$ 处的平均晶粒尺寸最小,这是由于坯料在较高的速度下挤压,变形率增大,晶体再结晶的速度加快,导致晶粒变得细小一些。在所选取的挤压筒温范围值内,挤压筒温在 470°C 处时的平均晶粒尺寸最小,为 $97.467\mu\text{m}$ 。模具的预热温度处 485°C 时,平均晶粒尺寸达到了最小,为 $96.767\mu\text{m}$ 。综上分析可知,因素水平组合A4B1C4D3E2是能使坯料挤压成形时的平均晶粒尺寸达到最小的最优组合。

3.3.2 方差分析

在极差分析中判断了各因素对晶粒尺寸变化影响的主次关系与因素水平最优配比组合,在极差分析中无法估计试验设计时所出现的误差,而试验中的误差是必然存在的。方差分析能够弥补极差分析这一不足之处,还可以得出各因素影响晶粒尺寸的显著性水平,为了得到更精确的试验结论,令 α 的值分别为0.05和0.1,即置信度分别为95%和90%。下面对试验结果进行方差分析,如表5所示。

表5 方差分析

因素	偏差平方和	自由度	F比	F临界值 $\alpha=0.05$, $\alpha=0.1$	显著性 $\alpha=0.05$ $\alpha=0.1$
镁硅配比	1298.294	3	4.704	3.290 2.490	* **
挤压温度	35.624	3	0.129	3.290 2.490	* **
挤压速度	24.485	3	0.089	3.290 2.490	* **
挤压筒温	8.935	3	0.032	3.290 2.490	* **
模具预热温度	12.516	3	0.045	3.290 2.490	* **
误差	1379.85	15			

从表 5 可以看出, 对于平均晶粒尺寸的变化来说, 铝棒化学成分(镁硅配比)的 F 比均大于置信度为 95%和 90%时的 F 临界值 3.290 与 2.490, 因此该因素对平均晶粒尺寸的变化影响显著。

4 优化结果的试验验证

(1) 试验分析: 运用正交试验方法优化影响晶粒尺寸变化的主要工艺参数, 得知其工艺参数的主次顺序与最优配比组合。而所得的最优配比组合: 铝棒化学成分(镁硅配比)为 1.5:1、挤压温度为 520℃、挤压速度为 30m/min、模具预热温度为 485℃、挤压筒温为 470℃, 并没有在所选 $L_{16}(4^5)$ 正交表的试验方案中, 因此, 需对通过正交试验优化所得的最优配比组合进行实际生产试验验证。利用 ZEISS Axio Vert. A1 研究级倒置式材料金相显微镜(如图 5)对挤压件进行晶粒尺寸的观察。



图 5 晶粒尺寸的检测

(2) 试验结果: 观察表 6 可以发现, 晶粒尺寸的最高值为 $80.34 \mu\text{m}$, 最低值为 $72.31 \mu\text{m}$, 在进行试验时在所难免会出现误差, 因此, 去除最高值与最低值, 取其他三组试验结果的平均值得到晶粒尺寸的大小为 $77.01 \mu\text{m}$, 与正交试验中的 16 组试验相比, 所得的晶粒尺寸结果明显细化了不少, 进而验证运用正交试验方法优化所得到的各工艺参数最优配比组合具有可行性。

表 6 晶粒尺寸观察结果

组号 \ 列号	A/(mg:si)	B/°C	C/(m/min)	D/°C	E/°C	F/ μm
1	1.5:1	520	30	485	470	77.53
2	1.5:1	520	30	485	485	80.34
4	1.5:1	520	30	485	515	76.68
5	1.5:1	520	30	485	500	72.31
16	1.5:1	520	30	485	500	77.09

5 结论

本文结合有限元方法、塑性成形原理等基本理论知识, 针对挤压过程中工艺参数对金属内部晶粒尺寸的变化及工艺参数的优化问题进行研究探讨, 利用 UG 三维软件建立挤压结构的实体模型, 将其模型导入 DEFORM-3D 塑性成形软件中, 进行挤压成形过程的数值模拟分析。选取在成形过程中等效应变最大的两个点, 并运用 DEFORM-3D 软件中的 Microstructure 模块对等效应变最大两点处晶粒尺寸的变化进行跟踪观察。运用正交试验方法对主要工艺参数进行优化, 用极差分析判断出主要工艺参数对晶粒尺寸变化的主次顺序为: 铝棒化学成分(镁硅配比) > 挤压温度 > 挤压速度 > 模具预热温度 > 挤压筒温度。并得到了铝棒化学成分(镁硅配比)为 1.5:1、挤压温度为 520℃、挤压速度为 30m/min、模具预热温度为 485℃、挤压筒温为 470℃为最优配比组合。然后根据极差表中所对应的晶粒大小绘制这五个主要工艺参数与晶粒尺寸的关系图, 最后用方差分析进行了检验。将正交试验方法得到的优化结果采用 ZEISS Axio Vert. A1 研究级倒置式材料金相显微镜进行观察, 其晶粒尺寸明显得到了细化, 验证了理论的正确性。

[参考文献]

- [1] 高亚云. 复杂铝型材挤压模具结构优化及工艺参数优化研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2016.
- [2] 倪威, 倪红军, 王平, 等. 主要合金元素对 6063 铝型材表面质量的影响及控制[J]. 有色金属(冶炼部分), 2017(5): 59-63.
- [3] 刘石柏. 铝型材挤压成型数值模拟与模具结构优化设计研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2012.
- [4] 陈彪彪. 铝型材挤压的数值模拟及工艺研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2012.
- [5] 杨兵. 基于数值模拟的半轴套管复合锻挤模工艺设计和优化[D]. 长春: 长春工业大学, 2017.

作者简介: 库国辉(1988.3-)男, 职务: 工艺研究工作, 毕业院校: 长春工业大学, 专业: 机械工程。