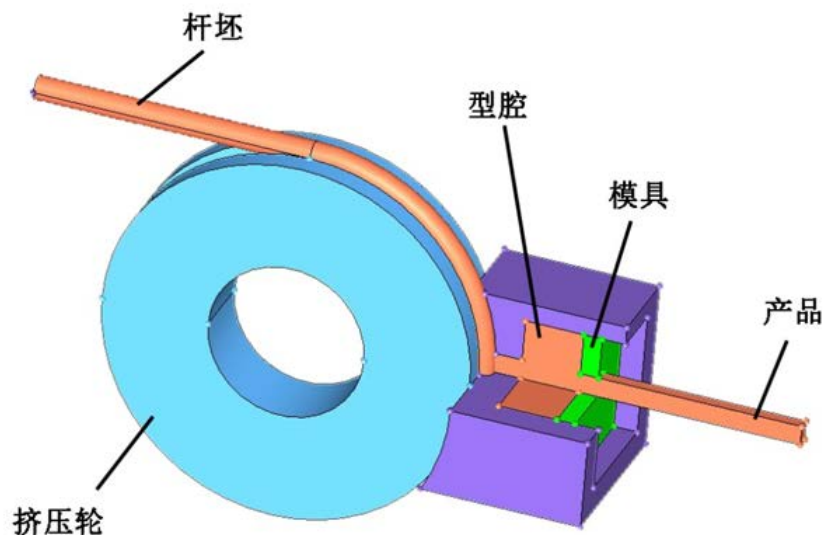




连续挤压Al-13Si-xCu-yMg合金的工程试制



案例制作：林高用 教授
中南大学材料科学与工程学院



案例来源与背景

连续挤压工艺试验方案

试验结果与分析

总结与思考



1 案例来源与背景

案例来源于湖南某有色金属材料加工公司，该公司与中南大学合作开发的合金化程度高达20%的共晶Al-13Si-xCu-yMg ($x+y=8\sim9$, $x>y$) 合金，属于难变形铸造Al-Si-Cu-Mg合金。该合金具有较高的强度和耐磨性，广泛应用于各种机械行业，如汽车轮毂、活塞、空气压缩机转片等。

采用锻造、挤压、轧制等塑性加工方式对传统的铸造铝硅合金进行加工成形，可有效提高其强度、韧性以及综合使用性能。

本案例采用Conform连续挤压工艺，利用其剧烈塑性变形，彻底破碎Al-13Si-xCu-yMg合金原有晶粒和硅相（初晶硅和共晶硅），改善其组织均匀性，达到提高合金强度与综合力学性能的目的。

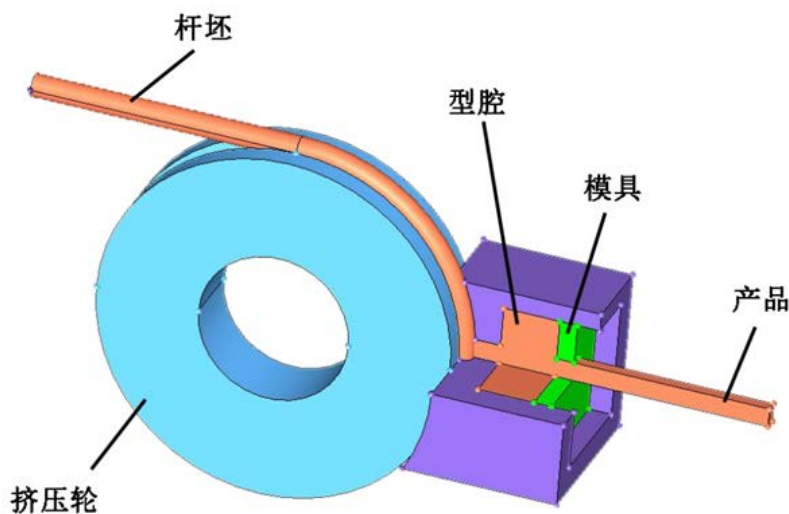


图1 应用滑片式空气压缩机及其滑片
(a) 滑片式空气压缩; (b) 滑片



1 案例来源与背景

连续挤压（Continuous Extrusion Forming，简称Conform）技术将常规压力加工成形中做无用功的摩擦力转变为**加热源和驱动力**。连续挤压高效地利用坯料与旋转挤压轮之间的强摩擦，以此产生**高温和高压**，使坯料产生足够的变形温度，同时坯料受到挤压轮三面的主动摩擦力和腔体一面阻碍摩擦力的作用，以真正连续大剪切变形方式直接挤压成制品。连续挤压基本原理如图2所示。



在连续挤压过程中，坯料经受强烈的**剪切变形**，并由剧烈塑性变形彻底破碎原有晶粒，实现晶粒微细化，可以显著改善变形中各晶粒之间的协调能力和变形的均匀性，从而提高难加工合金的加工性能和服役性能。

图2 连续挤压原理示意图



2 连续挤压工艺试验方案

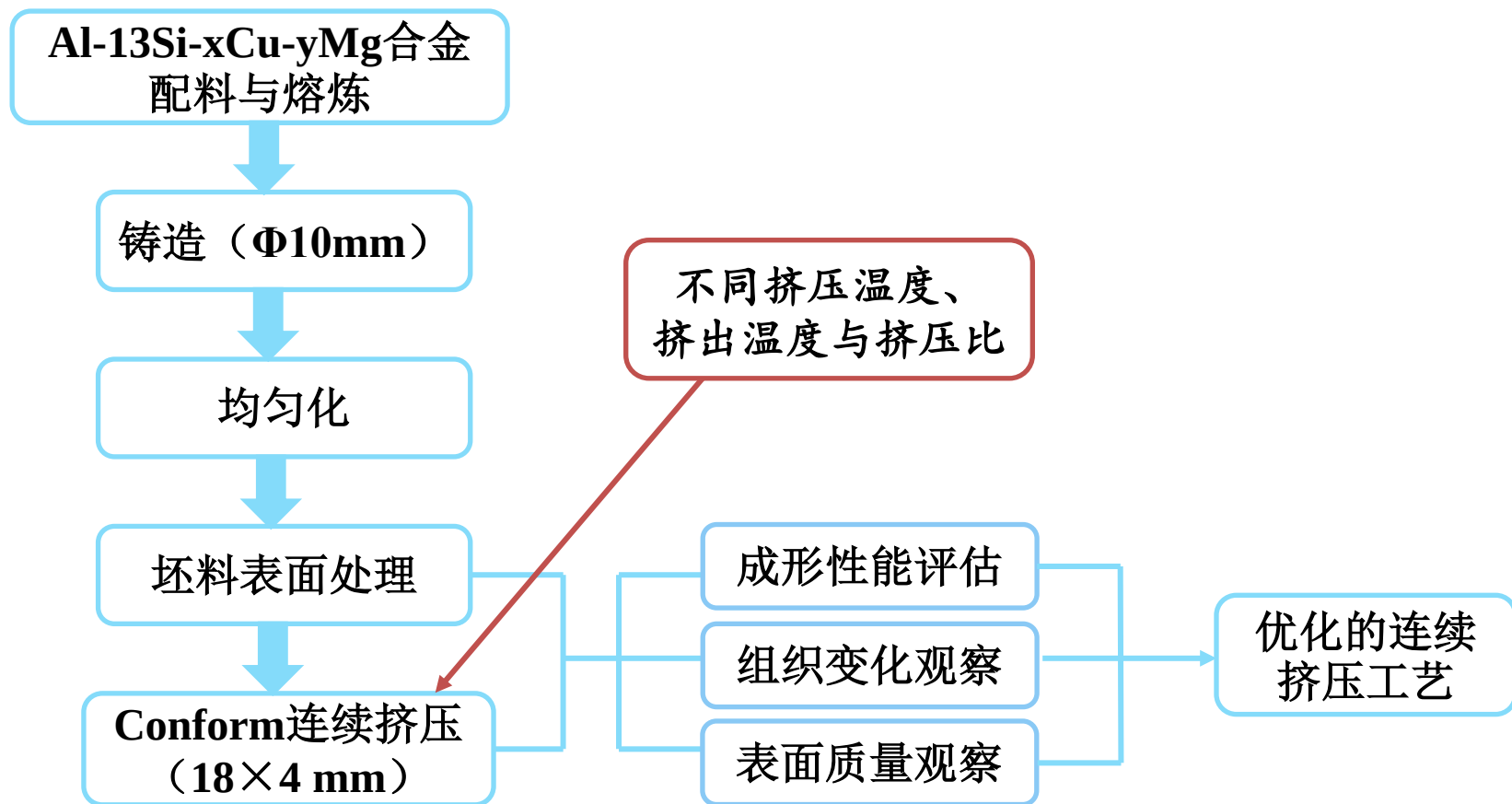


图3 Al-13Si-xCu-yMg合金连续挤压试验方案



3 试验结果与分析

3.1 连续挤压工艺试验结果

3.1.1 挤压速度和挤出温度

设置不同的挤压速度，对电流以及挤压出口温度进行记录，观察能否成功挤出Al-13Si-xCu-yMg合金扁排，具体数据如表1所示。

表1 Conform连续挤压挤出温度和挤压速度实测数据

Sample No.	Extrusion velocity, V / rpm	Exit temperature, T / $^{\circ}\text{C}$	Electric current, I / A	Succeed or Not
1	2.5	-	284	Not
2	3	-	273	Not
3	3.5	-	321	Not
4	4	410	182	Succeed
5	4.5	447	143	Succeed
6	5	463	101	Succeed
7	6	493	106	Succeed

最佳挤压速度
和挤出温度：
4.5rpm, 447 $^{\circ}\text{C}$

2.5rpm:
打滑

3~3.5rpm:
跑料
积料

4rpm:
边裂

5rpm~:
热裂纹

4.5rpm:
稳态挤压



3 试验结果与分析

3.1.1 挤压速度和挤出温度

$V=3\sim 3.5\text{rpm}$ 时，摩擦作用增强，坯料能进入型腔，但此时挤压温度仍偏低，杆料内外层存在较大温差，喂料时能听到清脆的“卡兹”坯料断裂声音，型腔内坯料流动十分不均匀，型腔未能被充满，大量坯料从喂料端溢出，造成“跑料”；同时由于传热不足，模具未得到良好的预热，坯料未能流入模具内，大量积累于型腔内并粘着于靴体上，造成“积料”。



图4 “跑料”现象 ($V=3\sim 3.5\text{ rpm}$)



图5 大量坯料粘着于靴体——“积料” ($V=3\sim 3.5\text{ rpm}$)



3 试验结果与分析

3.1.1 挤压速度和挤出温度

$V=4\text{rpm}$ 时, T 为 410°C , 成功挤出合金扁排, 但扁排成型前段棱角处常出现周期性裂纹。扁排显微组织存在明显的挤压流线, 初生第二相沿流线方向被拉长, 不均匀的分布于流线上, 此外合金内部存在大量的疏松。

原因: 挤压初期, 模具温度比挤入的金属低; 型腔内坯料存在温度差, 金属流动不均匀。



图6 挤制合金扁排边部裂纹
($V=4\text{ rpm}$, $T=410^{\circ}\text{C}$)

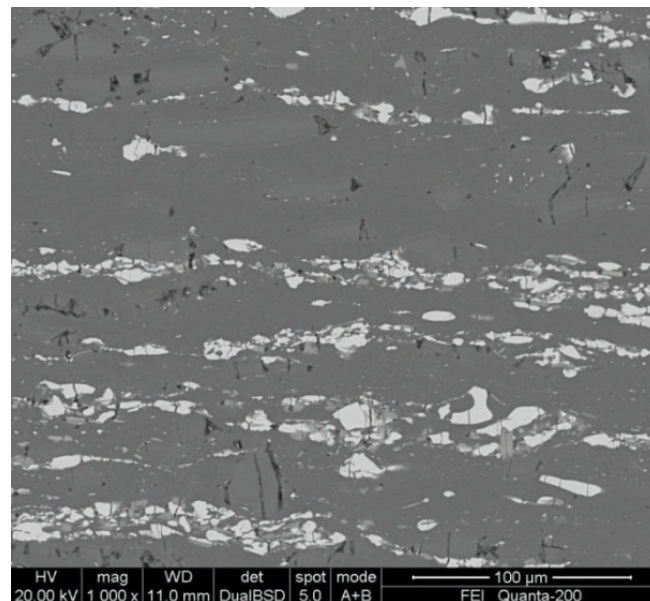


图7 挤制合金扁排微观组织
($V=4\text{ rpm}$, $T=410^{\circ}\text{C}$)



3 试验结果与分析

3.1.1 挤压速度和挤出温度

$V=4.5$ rpm时, $T=447^{\circ}\text{C}$, 成功挤制表面质量良好的合金扁排。其显微组织观察表明, 该温度下合金发生了不完全再结晶, 流线不明显, 初生第二相分布更为均匀, 但仍存在一定取向, 合金中的疏松也明显减少。



图8 挤制合金扁排
($V=4.5$ rpm, $T=447^{\circ}\text{C}$)

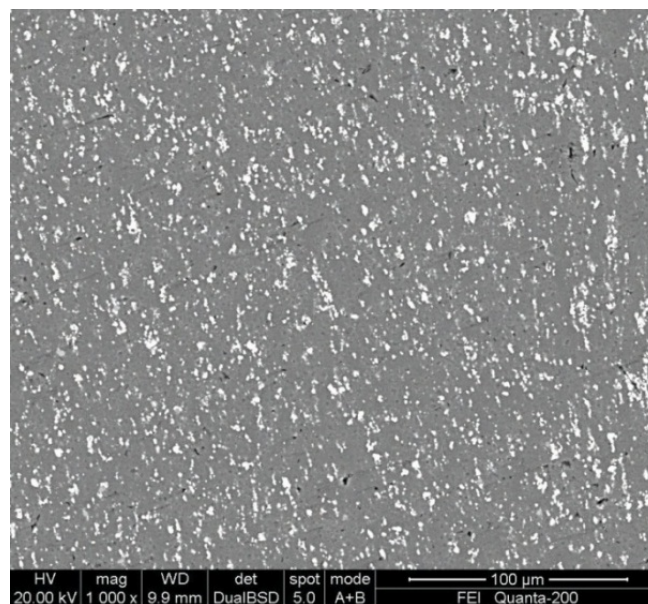


图9 挤制合金扁排显微组织
($V=4.5$ rpm, $T=447^{\circ}\text{C}$)



3 试验结果与分析

3.1.1 挤压速度和挤出温度

$V=5\sim 6$ rpm时, T 为 $463\sim 493^{\circ}\text{C}$, 挤出的合金扁排表面出现**热裂纹**。

原因: V 升高, 由变形引起剧烈的热效应, 坯料温度急剧上升, 产生**高温脆性**; 同时**挤压模具的散热相对滞后**, 坯料进入模具后受到的接触面摩擦力增加, 表层金属的流动速度低于中心层金属, 导致**金属变形不均匀**, 产生附加拉应力。

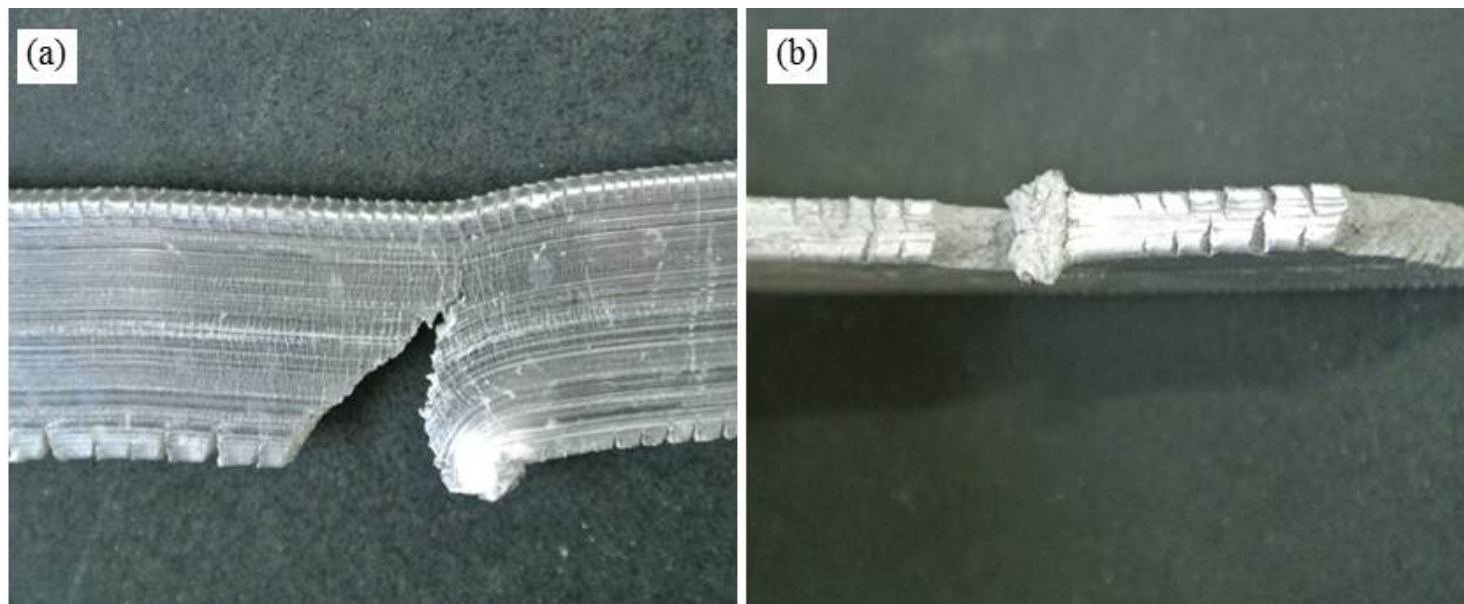


图10 挤制合金扁排热裂纹 (a) 正面; (b) 侧面
($V=5\sim 6$ rpm, $T=463\sim 493^{\circ}\text{C}$)



3 试验结果与分析

最佳挤压速度
和挤出温度：
4.5rpm, 447°C

3.1.1 挤压速度和挤出温度

对热裂纹的断口进行断口扫描，由图11知，大部分断口呈晶粒状，属于典型的沿晶断裂，同时，还存在少量的解理面，表明该合金高温下的断裂主要以脆性断裂为主，合金的高温脆性现象较明显。

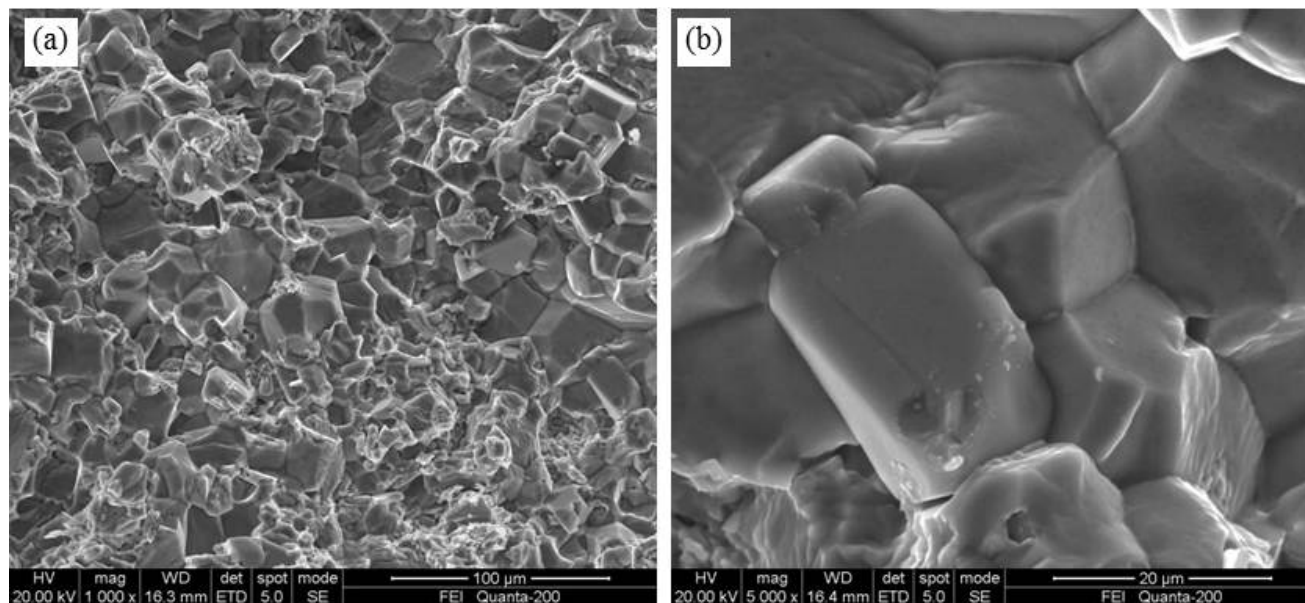


图11 热裂纹断口扫描 (a) 低倍; (b) 高倍

($V=5\sim6$ rpm, $T=463\sim493^{\circ}\text{C}$)



3 试验结果与分析

3.1.2 挤压比

设定挤压速度 $V=4.5$ rpm，挤出温度 $T=447^{\circ}\text{C}$ ，通过改变挤压腔尺寸来改变挤压比，具体方案及实验结果见表2。由表知，当 $\lambda=6.28$ 和 $\lambda=8.55$ 时，均可以实现Al-13Si-xCu-yMg合金扁排的不断挤压。

在该范围内可选择 $\lambda=8.55$ ，以连续挤压的增加生产速率。

挤压比 $\lambda=11.16$ 时，无法挤出合金扁排，并且模具发生了破坏性的损伤。

原因：挤压比过大，在摩擦力作用下，涌入挤压腔的坯料无法及时地挤出成形，在腔内大量堆积，形成高压状态；挤压腔内坯料对四周模壁的压力不断增加，当挤压力超过模具的抗拉强度时，模具发生突然性破裂，瞬间在巨大内应力的作用下，大量坯料从裂口涌出。这种情况在实际生产中将是十分危险的，必须杜绝。



图12 挤压模具的破坏性损伤

表2 不同挤压比下Al-13Si-xCu-yMg合金连续挤压情况

Sample No.	Diameter of Extrusion chamber, d_1/mm	Dimension of product, $(b_1 \times b_2)$ mm	Extrusion ratio, λ	Succeed or Not
1	24	18×4	6.28	Succeed
2	28		8.55	Succeed
3	32		11.16	Not



3 试验结果与分析

3.1.3 表面处理

坯料表面处理是挤压前的重要工序，目的是清洁坯料表面的污渍。在一段杆料表面涂抹机油，再进行连续挤压，所得合金扁排表面出现间断的气泡，见图14。

原因：杆料表面油污随杆料进入型腔、挤压腔，在这两个高温高压的腔体内，油污体积急剧膨胀，鼓起坯料；当坯料在模具内挤压成型时，鼓起的坯料向四周释放应力，在该区域形成鼓起空腔，成为**气泡**。气泡位于产品的表面或内部。



图13 表面涂抹着机油的杆坯



图14 产品表面气泡



3 试验结果与分析

3.1.4 优化的连续挤压工艺

优化出Al-13Si-xCu-yMg合金连续挤压工艺参数如表3所示。采用上述参数可顺利完成合金扁排（18×4 mm）的Conform连续挤压，实现小批量生产。

经优化固溶和时效热处理工艺后，该合金强度性能得到显著提高，抗拉强度和硬度分别达486.8MPa和152.0HBS，较挤压态试样分别提高3.3倍和31.3%。

经过后续的机加工，可将Al-13Si-xCu-yMg合金扁排（18×4 mm）加工成多种产品，图1所示的滑片式空气压缩机为其主要应用之一。

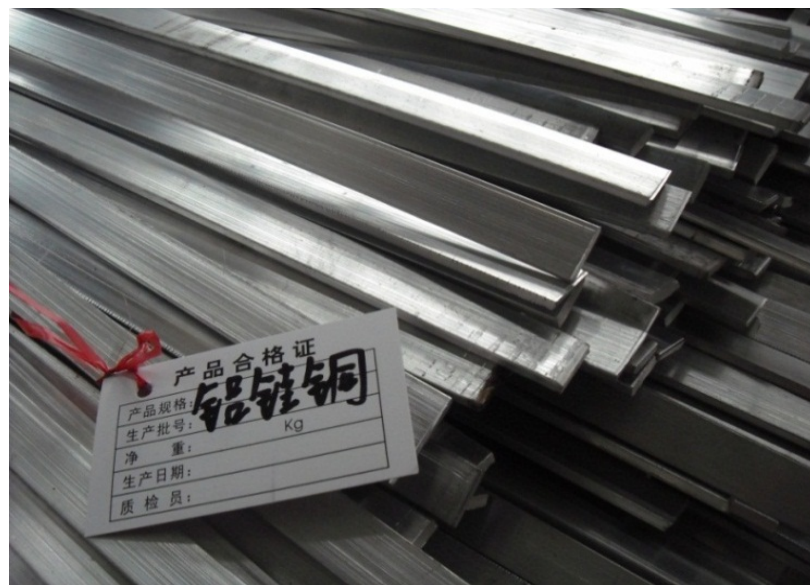


图15 批量生产的Al-13Si-xCu-yMg合金扁排

表3 Al-13Si-xCu-yMg合金Conform连续挤压参数

Extrusion velocity, v	Exit temperature, T	Extrusion ratio, λ
V/ rpm	$^{\circ}\text{C}$	
4.5	447	8.55

专利：
201210313190.3



3 试验结果与分析

3.2 连续挤压和常规挤压对比

3.2.1 组织对比

相比常规挤压，连续挤压后的合金呈现**更明显的加工流线**，共晶组织及第二相粒子均沿加工方向被拉长；合金组织较常规挤压的合金**组织更为细小**，晶界强化效果更为明显；但组织再结晶完整程度、致密度不及常规挤压。

原因：连续挤压不需预热坯料，由强烈的剪切变形使合金成型，晶粒被完全破碎；常规挤压需预热且温度较高，在变形过程中合金发生动态再结晶。

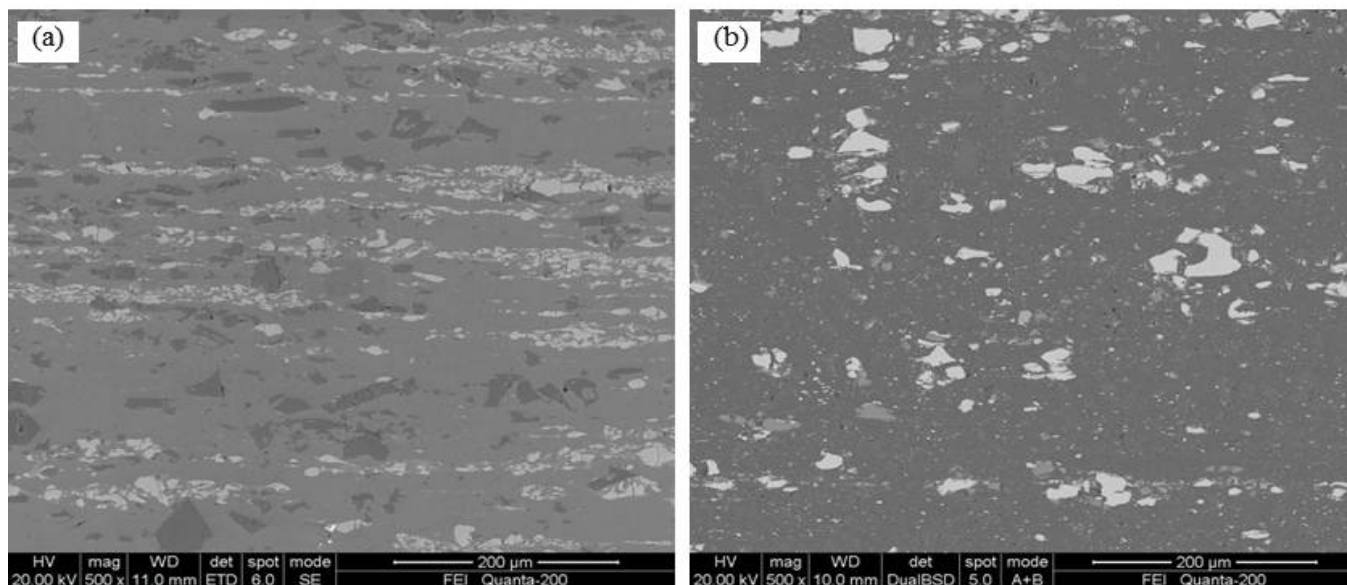


图16 Conform连续挤压和常规挤压微观组织 (a) 连续挤压; (b) 常规挤压



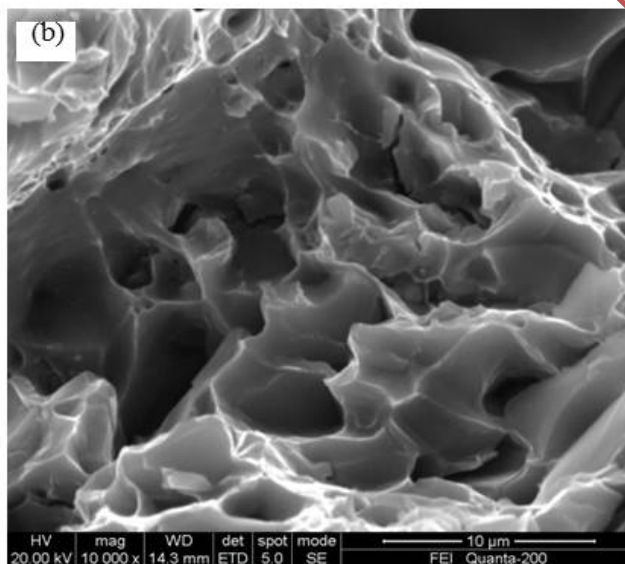
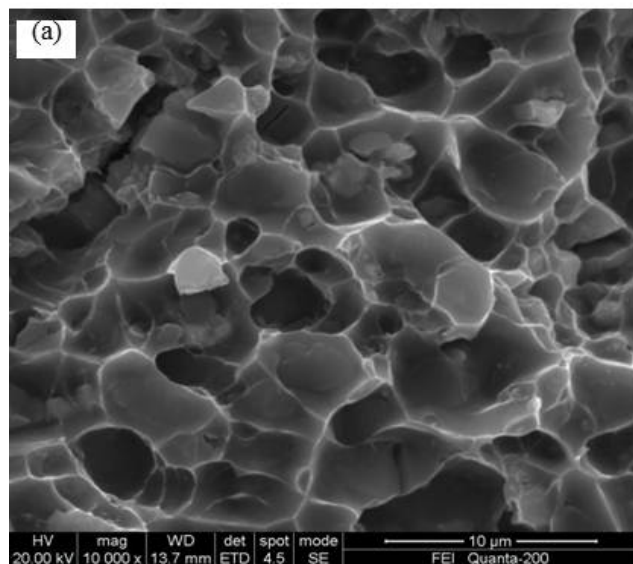
3 试验结果与分析

3.2.2 性能对比

相比常规挤压，Conform连续挤压后合金的强度、硬度与延伸均有所提高；拉伸断口分布着较深的韧窝，只存在相对少量解理面，且韧窝数量多、尺寸小；常规挤压的合金拉伸断口则存在大块的解理面。

表4 Conform连续挤压和常规挤压拉伸测试结果

State	Hardness,	Tensile strength,	Elongation,
	HBS	σ_b / MPa	δ /%
Continuous extrusion forming	115.8	112.6	11.3
Conventional extrusion	93.6	96.8	7.6



硬度↑23.7%
强度↑16.3%
延伸率↑48.7%

图17 Conform连续挤压和常规挤压拉伸断口 (a) 连续挤压; (b) 常规挤压



4 总结与思考

本案例采用Conform连续挤压对合金化程度高达20%的共晶Al-13Si-xCu-yMg ($x+y=8\sim 9$, $x>y$) 合金进行强塑性加工, 试制 $18\times 4\text{ mm}$ 的扁排产品, 同时探究了挤压速度、温度、挤压比以及表面处理对合金扁排连续挤压过程中金属流动性以及缺陷的影响, 完成了其连续挤压工艺的优化。

优化的Al-13Si-xCu-yMg合金扁排连续挤压工艺参数为: 挤压速度为4.5rpm, 挤出温度为 447°C , 挤压比为8.55。通过该工艺可以实现高合金化难变形Al-13Si-xCu-yMg合金铸造合金的强塑性变形, 批量生产 $18\times 4\text{ mm}$ 合金扁排。

Conform连续挤压的该合金扁排, 较常规挤压的产品组织更为细小, 流线更为明显; 硬度、 σ_b 和 δ 分别达115.8HBS、112.6MPa和11.3%, 较常规挤压试样分别提高23.7%、16.3%和48.7%。

深入思考:

- 1、连续挤压工艺的关键参数有哪些? 这些参数若选择不当可能会出现什么问题?
- 2、除连续挤压外, 还有哪些强塑性变形技术?
- 3、Al-Si合金中有哪些相结构? 对其加工和使用有何影响?



谢谢!

