

SiC_p/Al 复合材料挤压棒材缺陷分析^①

肖林 丁伟民 张国定

(上海交通大学复合材料研究所, 上海 200030)

摘 要

对铸造法制得的 SiC_p/Al 复合材料坯料挤压棒材缺陷—龟裂和撕皮产生的原因作了深入探讨。分析结果表明, 缺陷产生的原因主要有两个, 即温度条件和力学条件; 另外, 还与坯料的组织遗传性有关。

关键词: SiC_p/Al 挤压 龟裂 撕皮

SiC 颗粒增强 Al 基复合材料由于 SiC_p 的加入可以大幅度提高材质的弹性模量, 改善合金的低、高温强度、疲劳强度, 大大提高了合金的耐磨性能。金属基复合材料发展的未来前景主要在于非长纤维增强, 特别是 SiC_w 和 SiC_p 增强 Al 基复合材料, 这种复合材料具有各向同性的优良特性并能用普通合金的制造设备成型、加工, 能适用于不同的加工方法, 如挤压、锻造、轧制等。因此, 具有广泛的应用前景^[1-5]。本文对生产现场挤压铸造法制得的 SiC_p/Al 复合材料棒材产品两个常见缺陷: 龟裂与撕皮产生的原因作了探讨, 并提出了相应的工艺措施。

1 材料及实验方法

本实验所用材料为上海交通大学复合材料研究所研制的 SiC 颗粒增强 2024Al 和 6063Al 合金复合材料 (SiC_p/2024Al 和 SiC_p/6063Al)。增强体 SiC_p 尺寸为 14 μm, 含量为 12 Vol.-%, 基体 2024Al 成分 (wt.-%) 为: Cu3.8~4.9, Mg1.2~1.8, Mn0.3~0.9, 余量为 Al, Fe、Si

总量不大于 1.0。复合工艺采用机械搅拌铸造法, 在石墨坩埚内浇注成 $d120\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 铸锭, 车去表皮缺陷, 在型材加工厂卧式挤压机上一次挤压成 $d38\text{ mm}$ 的棒材。挤压前先在实验室进行过烧实验, 以确定临界挤压温度, 温度点选择 515、525、535、545℃。生产现场挤压工艺参数为: 坯料加热温度 470℃, 模具保温温度 470℃, 料筒温度 350℃, 保温时间 2 h, 挤压速度 2 mm/s, 表压读数 12 MPa, 挤压比 10。无润滑挤压时, 实验室挤压工艺参数为: 模具与料筒温度 250℃, 保温时间 1 h, 挤压速度 8 mm/s。石墨润滑挤压, 工艺参数同上。

2 实验结果与讨论

把 $d120\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的 SiC_p/2024Al 和 SiC_p/6063Al 铸造在卧式挤压机上, 并正挤成 $d38\text{ mm}$ 棒材, 即发现了两种明显的产品宏观缺陷, 龟裂和撕皮, 如图 1 所示。

2.1 裂纹产生的原因分析

图 2 为 SiC_p/2024Al 复合材料铸锭挤压成

^① 于 1993 年 6 月 1 日收到初稿

$\phi 38$ 棒材车去表面层缺陷后的实物照, 我们发现这种龟裂并不延伸到内部, 棒材经机加工除

缺陷后即显示出光泽表面。

2.1.1 温度条件

对龟裂组织进行微观组织分析, 发现温度是关键影响因素之一, 即使制订了较严格的挤压工艺, 但在挤压过程中由于存在升温, 其温度参数的控制仍然是困难的。金相和 SEM 分析表明: 龟裂组织发生了不同程度的过烧, 如图 3 所示。

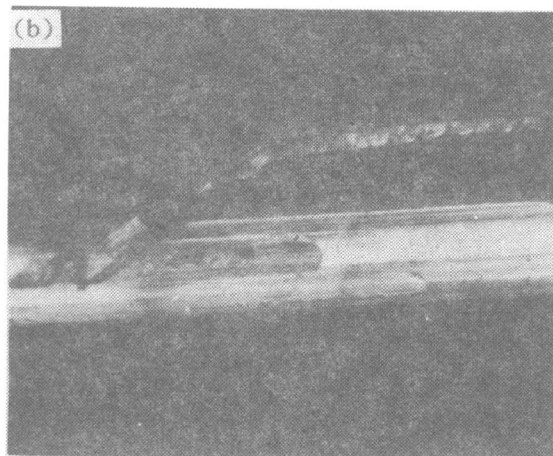
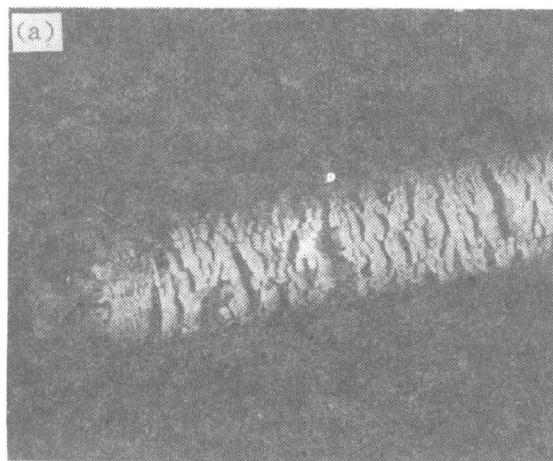


图1 生产现场挤压 SiC_p/Al 棒材宏观缺陷实物照

(a) — 龟裂; (b) — 撕皮

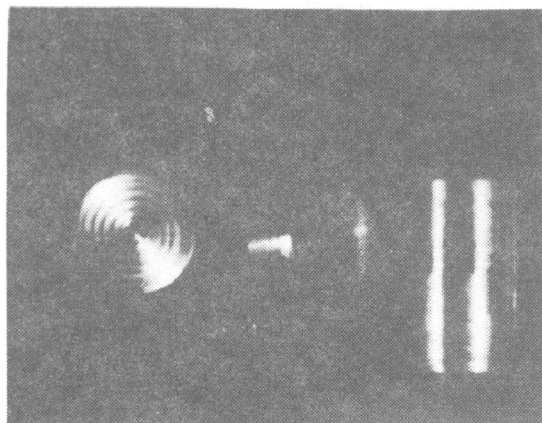


图2 生产现场挤压 SiC_p/Al 棒材车去表层缺陷后的实物照



图3 $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ 龟裂表层的 SEM 组织 ($\times 2\,000$)

为了进一步验证温度的影响, 在实验室做了进一步的试验, 图 4 是对应的 530°C 温度下挤压棒材的金相组织, 结果表明 520°C 左右是 $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ 的临界挤压温度, 超过此温度将可能引起过烧, 导致材料失效。 $500^\circ\text{C} \sim 520^\circ\text{C}$ 是过热温度, 生产上挤压坯料过热也是不允许

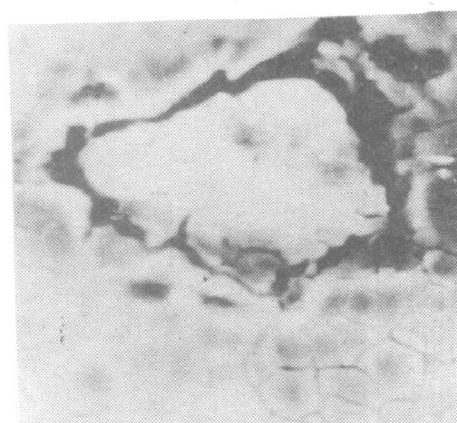


图4 实验室在 530°C 挤压 $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ 棒材金相组织 ($\times 200$)

的。

但是,这并不是说温度越低越好,温度太低不仅挤压困难,而且也有可能引起开裂,挤压温度和挤压速度是挤压过程中的两个基本参数。尽管挤压变形具有优越的压应力状态,但由于变形不均匀性,导致 SiC_p/Al 沿锭坯断面的流速差,而发生的纵向拉应力,超过一定限度便引起棒材制品产生周期性表面龟裂纹。在这种情况下,为了保持挤压制品的整体性,在挤压过程中,塑性变形区的温度必须与 SiC_p/Al 塑性最好的温度范围相适应。

塑性变形区的温度取决于坯料和模具的加热温度,变形热以及被周围介质吸收的热量。挤压速度或金属流动速度越大,被周围介质吸收的热量就越小,则塑性变形区的温度就越高,反之亦然。所以在一定的变形程度下,或者是选择合适的预热温度,或者是选择合适的变形速度,使塑性变形区的温度保持在规定的范围内,当变形速度较小时,必须提高预热温度,而变形速度较大时,则必须降低预热温度。

挤压过程中挤压温度和速度是不断变化的,在挤压 SiC_p/Al 复合材料时,挤压温度一般都选在 500°C 以下,挤压速度一般不大于 8 mm/s ,而且, SiC_p/Al 复合材料的导热性高,所以在挤压温度的选挤时,必须考虑塑性变形区温度场由于挤压的热传导和 SiC_p/Al 复合材料与模具之间的热交换而引起的温度变化,为计算挤压时的温度,传统的公式是^[6]:

$$\Delta T = \frac{AP_0}{C\rho} \gamma - \Delta t_0 \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{861}{\sqrt{\pi} (b_1 + b_2)} \cdot \sqrt{\frac{\eta}{Pe}} \right] \right\}$$

式中 A —热功当量;

P_0 —在塑变区中计算温度变化断面上的单位挤压力;

C —挤压金属的比热;

ρ —挤压金属的密度;

Δt_0 —毛坯和挤压筒的初始温差;

b_1, b_2 —分别为挤压筒和毛坯金属的蓄热

系数;

γ —取决于 Pe 和 η 值的系数;

η —挤压轴行程长度与挤压筒内径的比值, $\eta = h/D$;

Pe —彼克列(Пекле)准数, $Pe = v \cdot D/a$;

v —挤压速度(mm/s);

a —温度传导系数(m^2/s);

k —导热系数

若把 SiC_p/Al 复合材料和工具材料的热力学物理常数代入上述公式中,即可大大简化计算过程。

本工作没有对上述公式进行是否适合挤压 SiC_p/Al 复合材料的试验性研究。但有点是肯定的,即挤压 SiC_p/Al 复合材料,在确定挤压温度时,决不能忽略挤压过程的温升。

2.1.2 力学条件

SiC_p/Al 复合材料在挤压生产中,表面出现的这种周期性分布的龟裂纹,除与温度有关外,还与挤压的受力情况有关。

图5为 SiC_p/Al 复合材料挤压棒材的周期性龟裂纹示意图。图6为 SiC_p/Al 复合材料在挤压时的受力情况和裂纹发生与发展的过程。当附加拉应力与基本应力迭加后所得的工作拉应力值超过 SiC_p/Al 复合材料在该温度下的最大抗拉强度时,就会出现裂纹。工厂与实验室条件下的润滑摩擦不同,相应附加拉应力也不同,裂纹的形状取决于裂纹向深部扩展的速度 v_w 和坯料的流出速度 v_l 的相应关系,当出现第一条裂纹后,附加拉应力值减小,从而裂纹向深部扩展的速度减慢。这里可以认为 v_w 是等减速的,则在每一瞬间裂纹加深值为 Δr ,而制品以固定速度 v_l 移动 Δz 值。其结果就得到如图中 O_1K_1 曲线所示形状。当此裂纹扩展到一定深度后,使此局部的附加拉应力消失,裂纹停止发展,随后的材质会有由于拉应力的作用而出现第二条裂纹,第三条裂纹……,如此下去,便形成了图5所示的大量宏观可见的周期性龟裂纹。实物图见图1。

如前所述,挤压时裂纹的产生不只是与拉应力有关,还与“临界温度”有关。所谓临界温

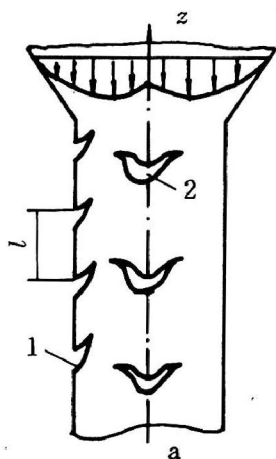


图5 SiC_p/Al 复合材料挤压棒材周期性
龟裂纹示意图

1—外部裂纹;2—内部裂纹

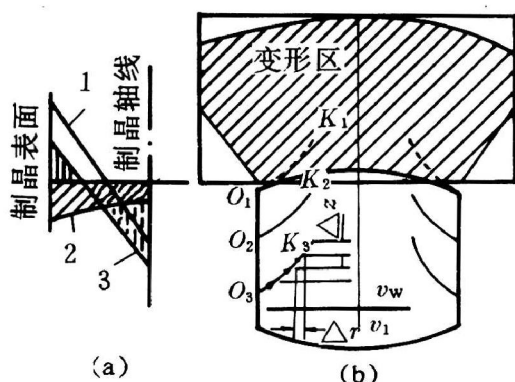


图6 SiC_p/Al 复合材料挤压棒材周期性
龟裂纹的形成过程

a—金属受力情况;b—裂纹的扩展过程

1—附加应力;2—基本应力;3—工作应力

度,就是在此温度下材料的抵抗拉应力的能力急剧下降从而引起裂纹的温度。本工作试验结果表明:SiC_p/2024Al 的临界温度为 520℃左右(515℃~525℃)。

针对挤压时产生周期性龟裂纹的原因,在挤压生产工艺上可以采用以下一些措施:(1)制订合理的温度速度规程;(2)增加变形区的基本应力数值,如增大挤压比,适当增大模子定径带长度以及采用带反压力挤压;(3)采用新的挤压技术,如梯温加热、水冷模挤压、润滑挤压等。

2.2 缺陷的组织与成分分析

观察龟裂层和撕裂层的组织,发现基体中存在大量的显微缩孔,图7可能是由于处于高温而发生过热时,液相最后凝固所形成的,也有可能是毛坯固有而遗传下来的。这些弥散的显微缩孔对界面的结合十分不利,在挤压时,它们会与氧化物等夹杂一起沿挤压方向形成层状或带状组织。这种组织极易被剥落下来。

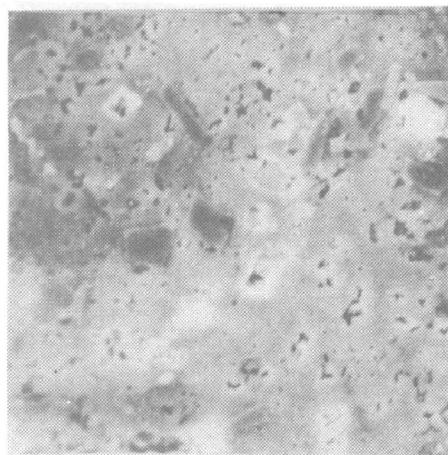


图7 SiC_p/2024Al 挤压棒材龟裂层的
显微缩孔(×1000)

对撕裂表皮,进行能谱分析,发现撕裂层内侧普遍存在显著的 Mg、Cu 等元素的晶内微区偏聚(也有可能是含 Mg、Cu 等元素的脱溶相)。从图8可见存在大量的白色氧化物且 SiC_p 已发生脱落并游离于白色氧化物之间。

我们对白色区域内的成分(主要是氧化物等)也进行了能谱分析。如图9,发现 Mg、Cu、Si 的偏聚更为严重,远远超过了 2024Al 的 Cu、Mg 的平均成分。这表明:Mg、Cu、Si 的偏聚及氧化物杂质的存在也是撕裂的原因之一。

在撕裂表面还观察到大量的 SiC_p 聚集群,有的是空洞中的 SiC_p 团聚,这是由于铸锭本身 SiC_p 分布的不均匀所致,而且,这些 SiC_p 与基体的界面结合不良,很易剥落(图10)。

对 SiC_p/6063Al 挤压棒材,我们也作了同样的分析,图11(a)为挤压棒材末端表层的 SEM 组织,可以见到大量的显微缩孔,这些缩孔经挤压后已沿挤压方向排列。图11(b)为 SEM 观察到的大量氧化物,经挤压后也呈带状

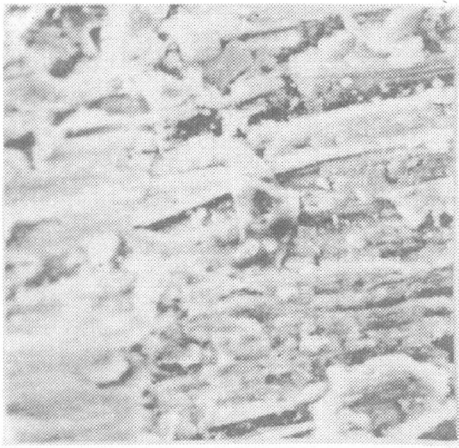


图 8 SiC_p/2024Al 挤压棒材
撕裂层的 SEM($\times 1000$)

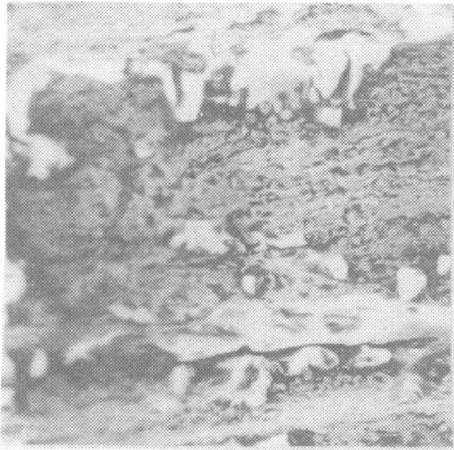


图 9 SiC_p/2024Al 挤压棒材
撕裂层的 SEM($\times 130$)

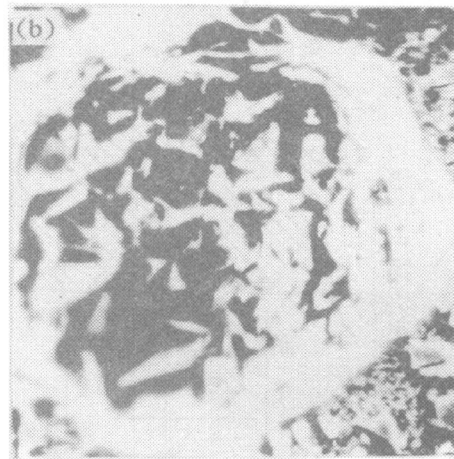
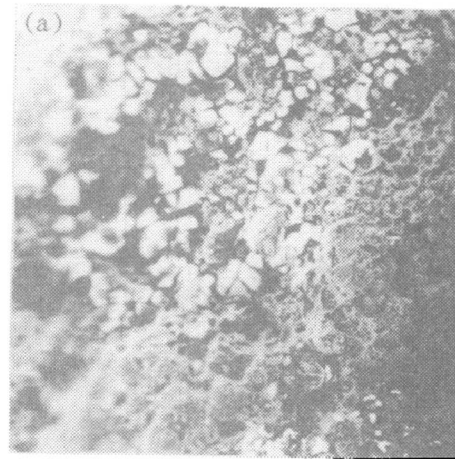


图 10 SiC_p/2024Al 中的 SiC_p 团聚
和空洞中的 SiC_p 堆集
(a) — $\times 96.0$; (b) — $\times 1010$

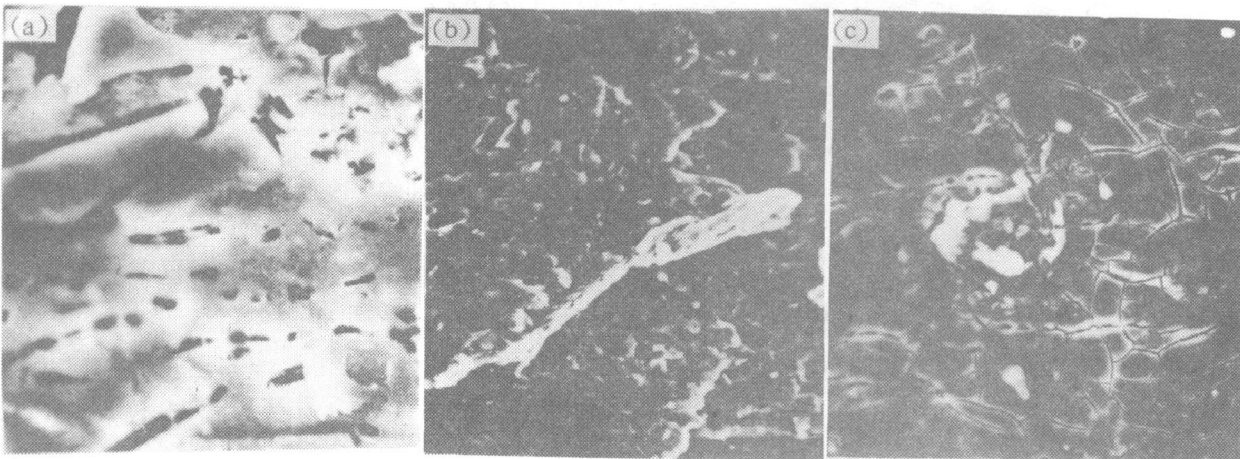


图 11 SiC_p/6063Al 挤压棒材表层缺陷显微组织 SEM 观察
(a) — ($\times 3000$); (b) — ($\times 700$); (c) — ($\times 800$)

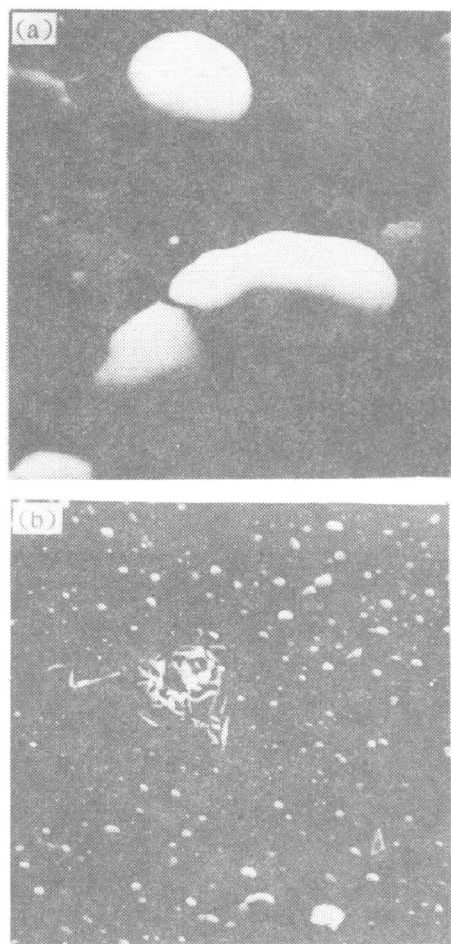


图 12 SiC_p/6063Al 铸锭组织 SEM 分析

(a) — 白球内主要成分 Al、Si、Cl、Ca (×4000)

(b) — 黑块状物的主要成分 Si, 无 Cl、Ca (×500)

排列, 很多 SiC_p 已被氧化物隔离于 Al 基体中。在氧化物与基体之间分布着大量的显微缩孔, 甚至有些空洞布于 SiC_p 与基体结合界面处或晶界处, 如图 11(c) 所示。

在本实验中, 挤压 SiC_p/6063Al 棒材时, 尽管我们控制温度在 500℃ 左右 (有人已在 540℃ 下成功挤压而不发生过烧)。但仍出现了更为严重的龟裂, 这除了与挤压过程中的升温

有关外, 显然, 还与其它因素有关, 为此, 我们进行了进一步的 SEM 和能谱分析, 结果表明: 基体内存在大量的白色球点, 弥散地分布在基体中 (图 12)。能谱分析表明, 白球内成分主要是含 Al、Si、Cl、Ca 等元素的化合物, 块状颗粒是 SiC_p, 基本不含 Cl、Ca 等元素; 而白球与 SiC_p 之间则主要是 Al 基体。

因此, 我们认为, Cl 可能是一种使 SiC_p/Al 复合材料产生龟裂的致命有害元素, 冶炼生产时应设法避免 Cl 的混入。

3 结论

(1) SiC_p/Al 复合材料挤压常见的外观缺陷是龟裂和撕皮。避免缺陷产生应控制两个条件: 一是温度条件, 挤压温度应为 450 ~ 480℃; 二是力学条件, 当附加拉应力与基本应力迭加后所得的工作拉应力值超过 SiC_p/Al 复合材料在该温度下的最大抗拉强度时, 就会出现裂纹, 因此, 应尽量减小附加拉应力值。

(2) SiC_p/Al 复合材料挤压棒材产品缺陷与锭坯中的氧化物、夹杂、空洞等有关。缺陷处往往存在不同程度的过烧和 Mg、Cu、Cl 等元素的微区偏聚。

参考文献

- 1 Materias Processing & Report, 1990, 5(7): 11.
- 2 Hunt M. Mater Eng, 1989, 106(1): 37.
- 3 Hunt M. Mater Eng, 1989, 106(10): 45.
- 4 Hunt M. Mater Eng, 1990, 107(1): 33.
- 5 Hunt M. Mater Eng, 1990, 107(6): 27.
- 6 刘静安. 轻合金挤压工具与模具. 北京: 冶金工业出版社, 1990.