

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0254

激光金属沉积 GH4169 在不同应变率下的 剪切特性及破坏机理研究*

李小龙, 李鹏辉, 郭伟国, 袁康博

(西北工业大学航空学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 为了能在传统的分离式 Hopkinson 压杆上准确可靠地测试激光金属沉积 GH4169 的动态剪切特性, 基于数值模拟方法对比分析了三种不同动态剪切试样形式及尺寸对剪切区应力分布的影响, 结果表明: 经过尺寸优化后的双剪切试样的剪切区剪应力占主导地位, 可实现近似纯剪切的动态剪切实验。利用此试样形式, 系统测试了不同取向(扫描方向、沉积方向)的 LMD GH4169 试样在不同应变率下的剪切应力应变曲线, 并对破坏后试样进行了 SEM 分析观察。结果表明: (1) 本文中采用的试样形式剪切纯度高, 应力沿剪切区宽度厚度分布均匀, 可以更好地得到材料的动态剪切特性; (2) 对实验所得剪应力-剪应变曲线进行分析, 发现本材料在扫描路径方向和沉积方向并没有表现出明显的各向异性, 但随着应变率的增加, 具有明显的应变率强化效应; 将单轴压缩和动态剪切应力应变曲线同时转换为等效应力应变曲线, 对比证实了试样形式能很好反应材料的剪切特性; (3) 通过对 LMD GH4169 剪切变形破坏试样的微观分析发现, 随着应变率升高, 断口韧窝尺寸和深度减小, 韧性降低, 在更小的变形量下容易剪切失效。初始微观缺陷容易导致材料的动态剪切破坏。

关键词: 激光金属沉积; 高温合金 GH4169; 应变率; 动态剪切; 破坏机理

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

Shear characteristics and failure mechanism of laser metal deposition GH4169 at different strain rates

LI Xiaolong, LI Penghui, GUO Weiguo, YUAN Kangbo

(School of aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China)

Abstract: In order to accurately and reliably test the dynamic shear characteristics of laser metal deposition GH4169 on a traditional split Hopkinson pressure bar, this study compared the three different dynamic shear sample forms and dimensions to the shear zone stress based on numerical simulation. The influence of the distribution shows that the shear stress of the shear zone of the double shear specimen after optimization is dominant, and the dynamic shear test of approximate pure shear can be realized. Using this specimen form, the shear stress-strain curves of LMD GH4169 specimens with different orientations (scanning direction, deposition direction) at different strain rates were systematically tested, and the specimens were analyzed by SEM. The results show that: (1) the specimen used in this paper has high shear purity and uniform thickness distribution along the shear zone width, which can better obtain the dynamic shear properties of the material; (2) the shear stress-shear strain curves obtained from the experiment were analyzed. It is found that the material shows unobvious anisotropy in the scanning path direction and deposition direction. With the increase of strain rate, it has obvious strain rate strengthening effect; the uniaxial compression and dynamic shear stress-strain curves were simultaneously converted into equivalent stress-strain curves; the comparison confirms that the specimen form in this manuscript can exactly reflect the shear properties of the material; (3) through the microscopic analysis of the shear deformation of LMD GH4169, the size and depth of the fracture

* 收稿日期: 2019-06-24; 修回日期: 2020-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(11872051, 11572261, 11372255)

第一作者: 李小龙(1995—), 男, 硕士研究生, lx1006@mail.nwpu.edu.cn

通信作者: 李鹏辉(1991—), 男, 博士研究生, lipenghui359@mail.nwpu.edu.cn

dimple decrease as the strain rate increases, and the toughness decreases. The shear failure is easy under a smaller deformation. Initial microscopic defects are likely to cause dynamic shear failure of the material.

Keywords: laser metal deposition; GH4169; strain rate; dynamic shear; fracture mechanism

激光金属沉积(laser metal deposition, LMD)是一种将金属粉末以保护气流的形式通过喷嘴引入高功率激光形成的高温熔池中进行熔融堆积成形的增材制造技术,该技术对破损金属件的局部修复也具有显著优势。镍基高温合金 GH4169(美标 Inconel 718)由于其优异的高温力学性能而成为航空发动机中应用最广泛的高温金属材料。激光金属沉积 GH4169(LMD GH4169)已被用于发动机涡轮盘、叶片、机匣、支撑件和紧固件等关键部件。但这些静止和高速转动部件在试车及使用工况中,容易遭受外来撞击物或其他破坏件诱发的强冲击载荷作用,材料极易发生绝热剪切失效^[1]。因此,对 LMD GH4169 在动态载荷下的剪切性能及失效机理的研究一致受到科学家和研发人员的关注。

Wang 等^[2]对选择性激光熔炼(selective laser melting, SLM) GH4169 的工艺、热处理及力学性能进行了研究,与锻造 GH4169 室温拉伸强度和延伸性对比,结果表明,SLM GH4169 良好的冶金结合和缺陷控制、激光快速熔融和冷却引起的晶粒细化以及热处理是保证 GH4169 优良机械性能的关键因素。Zhang 等^[3]对比 SLM 工艺和铸造法制备的 GH4169 显微组织和拉伸力学性能,发现 SLM GH4169 在不同热处理下拉伸强度差异很大,且低于铸造合金的拉伸强度。而 Trosch 等^[4]研究表明 SLM GH4169 的力学性能优于锻造和铸造 GH4169。Qi 等^[5]研究了 LMD GH4169 材料不同热处理状态(沉积态、直接时效、固溶时效和完全均匀化后)下的拉伸性能,结果表明,直接时效热处理产生的拉伸强度最高,其强度与铸造的材料相当,完全均匀化热处理得到了最佳的韧性和拉伸强度。Yuan 等^[6]利用 LMD 工艺制备了具有三组不同参数的 GH4169 高温合金,对这些样品进行了应变率从 0.001 s^{-1} 到 5000 s^{-1} 的压缩试验,发现:在塑性流动应力随温度变化的过程中,会出现一个随温度增加流动应力增加的异常峰值,并证明了这是第三型应变时效现象。Lee 等^[7]利用 SHTB 系统研究了 Inconel 718 在大范围高剪切应变率和温度下的动态剪切变形行为,并通过 OM 和 SEM 对断口进行了检测,结果表明,Inconel 718 的温度敏感性随应变率的降低和温度的升高而降低。Johansson 等^[8]对 Inconel 718 在加工过程中以及帽型剪切试验中形成的 ASB 的微观结构进行了详细的研究,他将帽型试样中形成的剪切带与金属切屑中形成的剪切带进行对比,发现,两种剪切发生过程具有相似的缺陷,如等轴晶晶粒和明显的剪切结构。

鉴于现有文献缺乏对 LMD GH4169 合金静、动态剪切力学性能的研究,本文特别以 LMD GH4169 为对象,首先基于数值仿真,选取动态纯剪切试样形式,结合 LMD 工艺材质各向异性,对 LMD GH4169 进行由准静态到高应变率下的剪切性能研究,并对变形破坏试样进行 SEM 微观分析,以揭示材料剪切破坏的微观机理。

1 纯剪切试样的数值优化

1.1 试样形式设计

图 1(a)帽形试样是 Meyers^[9]于 1986 年提出的,在高应变率加载下,帽形试样独特的结构形式可使塑性变形处在一个很窄的区域内,试样剪切区域很容易发生动态剪切变形,但帽形试样剪切区的宽度和内外径比的变化会影响到剪切区内应力的均匀性和绝热剪切带(ASB)的出现^[10]。Song 等^[11]采用一种平板式帽型试样(图 1(b)),这种试样形式剪切区的可视性好,方便直接观测剪切区的破坏发展过程。许泽建等^[12]提出一种新型纯双剪切试样,见图 1(c),通过剪切区沟槽设计,可有效地将剪切变形控制在狭条区域,使得剪切区的应力均匀性较好,更准确获取材料的冲击剪切性能。

本文中采用 ABAQUS/Explicit 有限元软件对上述三种剪切试样进行数值模拟计算,试图找出最优的剪切区几何形式,特别是剪切区宽度,进而确定合适的剪切试样。对于图 1 中三种形式的试样,针对剪切区宽度分别给出了三种不同的尺寸,具体数值如表 1 所示。

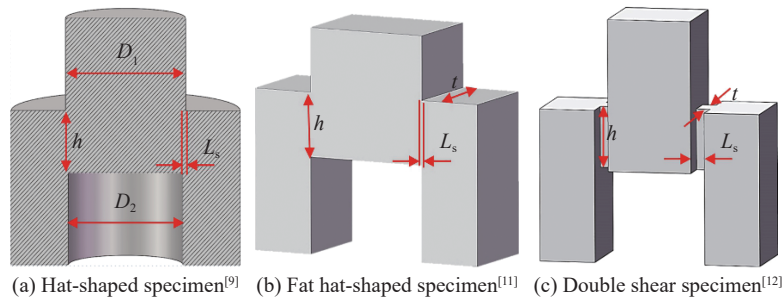


图 1 三种试样形式

Fig. 1 Three sample forms

表 1 三种试样尺寸

Table 1 Sizes of three specimens

试样形式	剪切区宽度 L_s /mm	剪切区高度 h /mm	剪切区厚度 t /mm
帽型试样 ^[9]	0/0.1/0.2	2	-
片式帽型试样 ^[11]	0/0.2/0.5	2	3
双剪切试样 ^[12]	0.2/0.5/1	2	0.5

1.2 数值建模及参数选取

选用 ABAQUS/Explicit 有限元软件, 对 SHPB 的杆-试样加载区进行全尺寸建模。其中 SHPB 杆采用三维实体模型, 尺寸与实际一致。由于片式帽型试样^[11]、双剪切试样^[12]实际是一种三点弯曲加载模式, 片式和双剪试样的两根直立式支腿在加载过程中同时有弯矩产生, 使得与加载杆接触部分的支腿容易向外侧滑移动(取决于试样与杆界面摩擦力), 因此在本文实验中, 特别设计了一个套筒夹具来限制支腿的弯曲和侧滑运动。试样网格单元为 C3D8R, 为保证模拟的精确性, 对试样的剪切区域网格采用局部布点, 划分为更细小的网格, 网格尺寸为 0.075 mm。加载方式选用在入射杆远离试样的一端施加入射脉冲, 此脉冲来自于真实实验入射杆中的加载脉冲, 以此模拟更为真实的加载载荷, 加载脉冲与模型装配如图 2 所示。

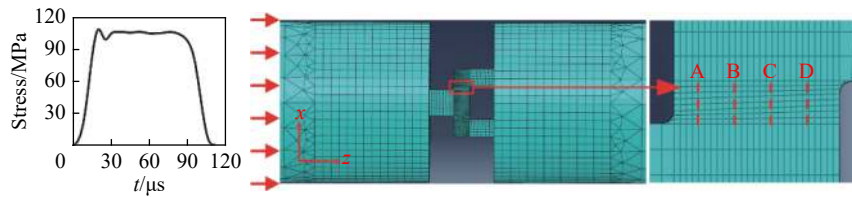


图 2 加载脉冲与模型装配图

Fig. 2 Loading pulse and model assembly drawing

在数值模拟中, 由于压杆不发生塑性变形, 因此将其定义为弹性材料。考虑到温度和应变率敏感性, 模拟中使用 Johnson-Cook 模型^[13]描述 LMD GH4169 的塑性流动性能:

$$\sigma_{JC} = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中: A 为材料初始强度, B 为应变硬化模量, ε 为等效塑性应变, n 为塑性应变硬化指数, C 为应变率敏感系数, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率, $\dot{\varepsilon}$ 为塑性应变率, m 为温度软化指数, T_m 为材料熔点温度, T_0 为参考温度(一般取室温)。

在这个模拟中, 没有考虑损伤和断裂准则, 只是为了了解在剪切断裂前的变形过程中, 应力中剪切分量的百分比, 相应参数如表 2~3 所示。

表 2 材料弹性参数

Table 2 Material elasticity parameters

材料	E/GPa	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	μ
18Ni钢	190	7800	0.3
GH4169	210	8240	0.3

注: E 为弹性模量, ρ 为密度, μ 为泊松比。

表 3 GH4169 的 J-C 本构模型参数^[13]

Table 3 J-C constitutive model parameters of GH4169^[13]

A/MPa	B/MPa	n	C	m
1241	622	0.6522	0.0134	1.3

越大, 而其余分量的应力峰值越来越小, 故剪应力的占比越来越大。也就是说, 剪切宽度越小, 加载形式越接近纯剪切。

1.3 数值模拟结果与分析

从模拟结果中导出 3 种类型试样剪切区的所有单元应力分量的平均值。应力分量 s_{11} 代表着 σ_x , 载荷是沿着 z 轴正向施加于入射杆端的, s_{13} 对应着 σ_{xz} , 表示剪切区的剪应力分量。

由图 3 可以看出, 在相同条件下, 只有双剪切试样(图 1(c))的剪切分量 s_{13} 占比最高, 而其它试样形式均存在着其它应力分量(s_{11} , s_{22} , s_{33})占比也很高。因此, 就以剪应力分量 s_{13} 所占百分比为纯剪切的指标而言, 选择双剪切试样最为合适。从三种试样形式的应力分量图可以看出, 随着剪切区宽度的减小, 剪应力 s_{13} 应力峰值越来越

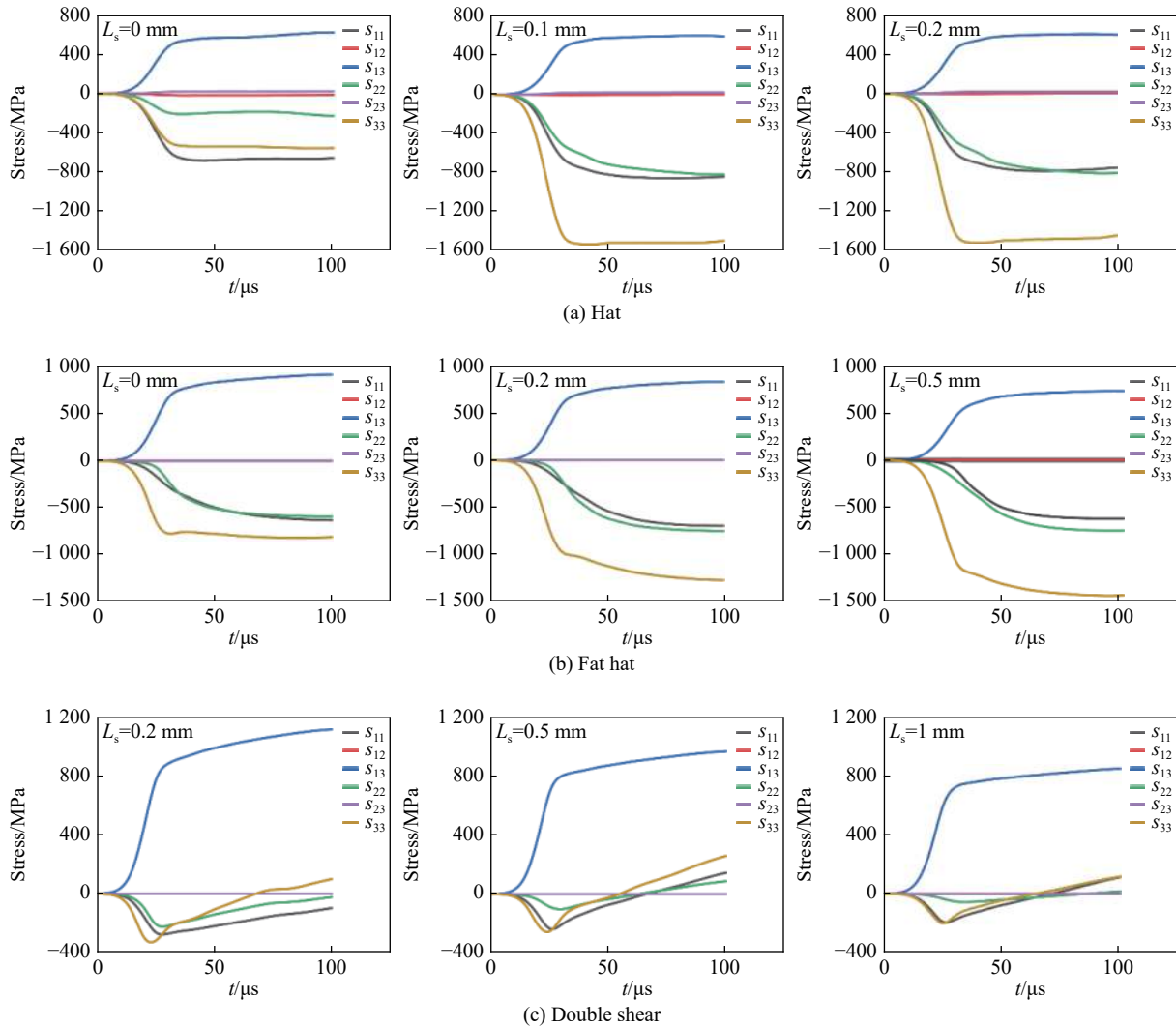


图 3 剪切区应力分量-时间曲线

Fig. 3 Stress component-time curves of shear zone

为了定量研究试样剪切区内应力场的均匀性, 对所选取双剪切试样(图 1(c))形式的三种不同的剪切区宽度(0.2、0.5、1 mm)进行剖分, 分别对沿剪切区宽度和厚度方向的应力分布进行了分析。在试样剪切区内沿宽度和厚度方向等距划分, 等间隔取路径 A、B、C、D 共 4 个路径, 如图 2 中所示, 将剪切区等分为 5 个区域。路径间隔为 0.4 mm, 分别沿宽度和厚度方向输出沿 4 条路径的剪应力曲线。

数值模拟波形如图 4 所示, 可以看出, 基本符合 $\varepsilon_I + \varepsilon_R = \varepsilon_T$, 其中 ε_I 、 ε_R 和 ε_T 分别是由 SHPB 加载杆上应变片测得的人射、反射和透射应变历程; 入射波与反射波叠加的前端部分出现波动, 这是弥散效应导致的, 而整体上在透射波的上下起伏, 表明试样在受载的过程中满足一维波均匀性假设并满足应力平衡。为了得到加载过程中剪切区宽度及厚度方向不同路径的应力分量, 选取在应力波传到试样 25 μs 时刻, 得到应力分量曲线, 如图 5 所示。沿厚度方向, 随着剪切区宽度的增加, 各个应力分量趋倾向稳定, 波动变小, 并且 s_{13} 始终占主导地位。沿宽度方向, s_{13} 越来越趋向平稳, 在曲线的两端有不同程度的翘起或者下降, 这是因为在边界处受到试样头部和支撑部的影响, 但在中间部位基本上都是稳定的。除 s_{13} 外, 其余的应力分量随着剪切区宽度增加波动起伏程度也更加剧烈。结合上述结果, 考虑到试样的纯剪切程度、应力分布均匀性以及加工难度和加工精度的影响, 最终实验试样选取剪切宽度为 0.5 mm 的双剪切试样。

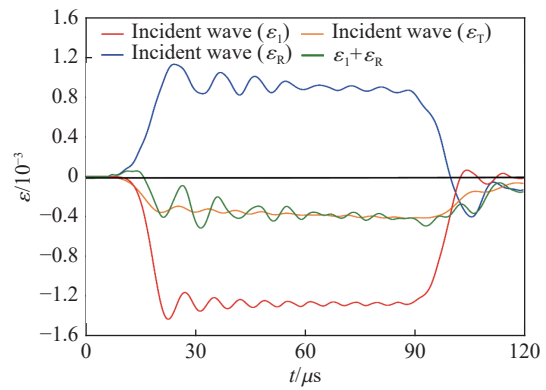


图 4 数值模拟波形图
Fig. 4 Numerical simulation waves

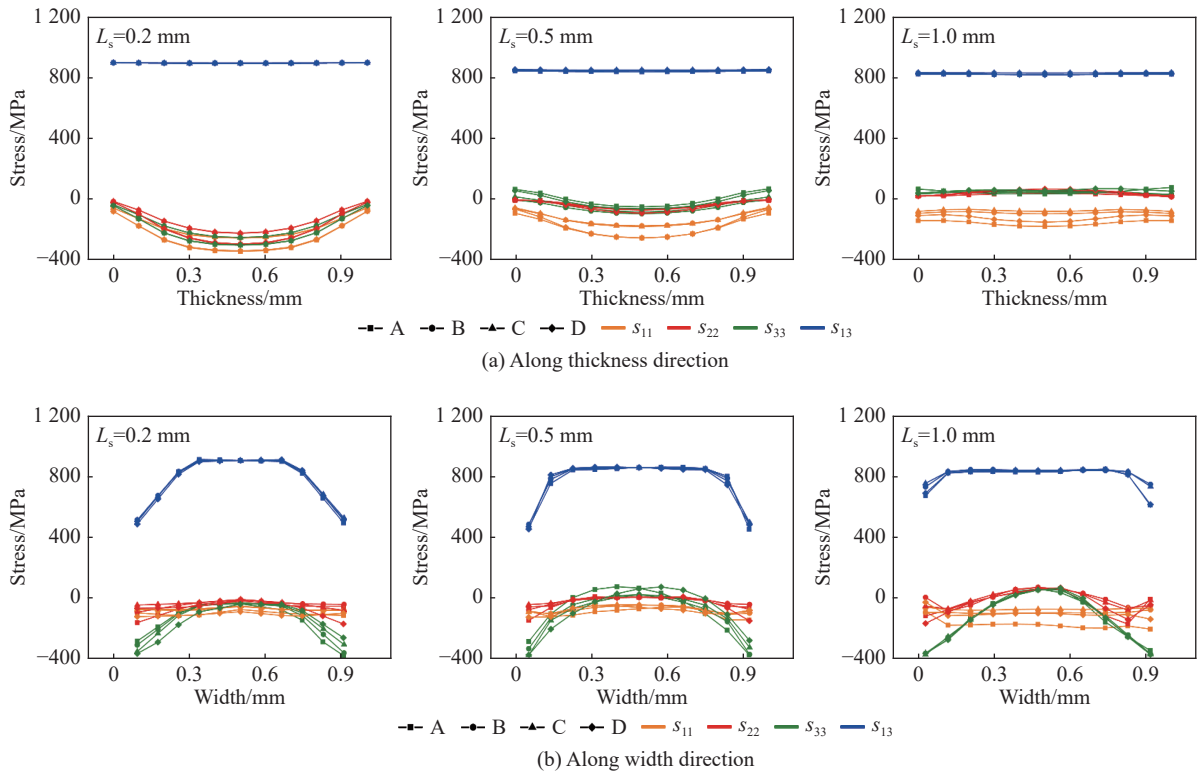


图 5 剪切区应力分量随宽度的变化曲线

Fig. 5 Curves of shear zone stress component vary with width

2 实验方法与过程

2.1 实验材料

实验的 LMD GH4169 合金由西北工业大学凝固技术国家重点实验室制备。制备系统主要包括 RS-850 型 5KW CO₂ 连续激光器、GTV PF2/2 型高精度双路可调送粉器 LMP-408、四轴三联动数控工作台、四路同轴送粉喷嘴以及惰性气氛保护箱等。GH4169 合金粉末化学成分的质量分数分别为: Mo, 3.18%; Nb, 4.91%; Cr, 19.68%; Ni, 51.75%; Al, 0.63%; Ti, 0.97%; 其余为 Fe。主要工艺参数如表 4 所示。

表 4 LMD GH4169 工艺参数
Table 4 LMD GH4169 process parameters

激光功率/W	扫描速度/(mm·s ⁻¹)	送粉速度/(g·min ⁻¹)	载粉气流/(L·min ⁻¹)	光斑直径/mm	搭接率/%	抬升高度/mm
2200	10	9	7	3	50	0.3

实验材料为沉积态,激光扫描路径为往复交叉光栅式扫描(图 6(b))。分别选取材料的不同方向进行微观分析,见图 6(a),*x* 和 *y* 向均为扫描方向,即粗大柱状晶的顶部形态,沿沉积方向可以看到有略微倾斜生长的柱状晶粒。试样形式采用上节经过数值模拟优化的双剪切试样形式(*L_s*=0.5 mm)。由于 LMD GH4169 在成形工艺上具有各向异性,因此按剪切区方向选取两组试样,即横向试样 *x* 向(纵轴线沿扫描方向)和纵向试样 *z* 向(纵轴线沿沉积方向),见图 6(b)。

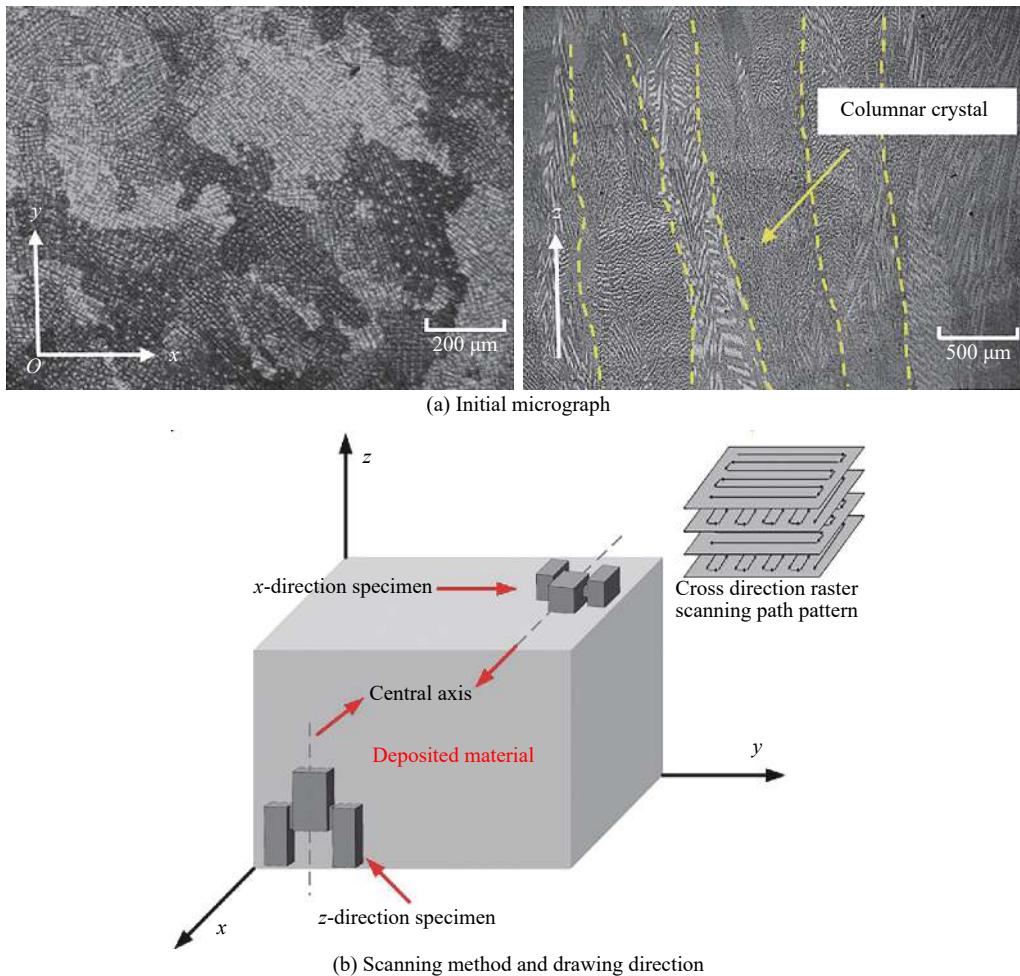


图 6 实验材料

Fig. 6 Experimental material

2.2 实验方法

在 SHPB 动态加载分析中, 一般假设剪切区为简单剪切应力状态, 如图 7 所示。应力波到达入射杆与试样界面时, 给试样顶部一个 U_1 的作用力, 此时透射杆反映的是试样实际承载历程 U_T 。如果试样两支腿没有套筒的侧向约束, 试样两端加载的载荷不共轴, 产生弯矩 M , 这样会对剪切区产生有横向的压力, 不再是简单剪切应力状态, 如图 8 所示。如果试样剪切区是纯剪切滑移变形, 理想情况下试样不会有侧向位移。故而在实验时必须给试样匹配紧凑的套筒, 配合外部套筒, 以防止产生弯曲而导致复杂的作用力。

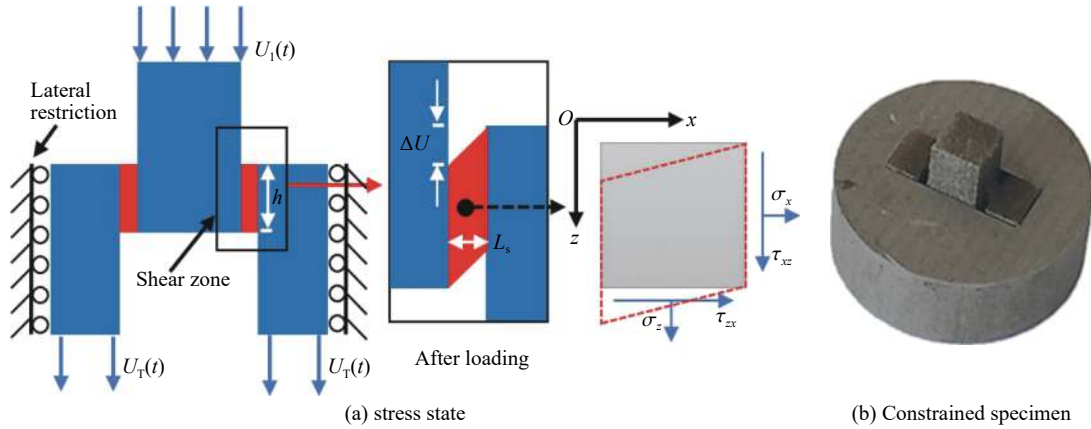


图 7 加约束受力分析

Fig. 7 Constrained stress analysis

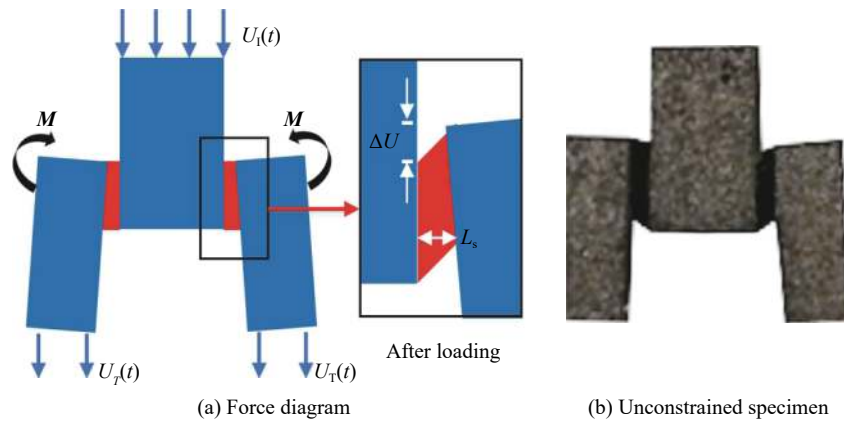


图 8 未加约束受力分析

Fig. 8 Unconstrained stress analysis

实验采用 SHPB 装置, 由于剪切区弱小, 为保证透射杆能清晰采集到信号, 子弹、入射杆以及透射杆均采用 6065 铝合金杆, 杆直径为 14.5 mm, 较为细小的杆子可以减小波的弥散效应^[14]。实验时, 为了限制试样沿垂直于加载方向的位移, 避免发生弯曲导致剪应力分量减小, 采用了套筒夹持装置, 整体配合如图 9 所示。

根据一维应力波理论, 可从 SHPB 杆所得信号得到杆-试样端面的位移和力^[12]:

$$u_1 = c_0 \int_0^t (\varepsilon_1 - \varepsilon_R) dt \tag{2}$$

$$u_2 = c_0 \int_0^t \varepsilon_T dt \tag{3}$$

$$F_1 = EA(\varepsilon_1 + \varepsilon_R) \tag{4}$$

$$F_2 = EA\varepsilon_T \tag{5}$$

式中: F_1 、 F_2 和 u_1 、 u_2 分别是入射杆-试样端、试样-透射杆端力和位移; E 和 A 是入射杆和透射杆的弹性模量和横截面面积; c_0 是入射杆和透射杆的弹性波速。由此, 剪应力 σ 、位移变形量 U 和名义应变率 $\dot{\gamma}$ 的表达式如下:

$$\tau = \frac{F_1 + F_2}{2A_s} \tag{6}$$

$$U = u_1 - u_2 \tag{7}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{dU}{L_s dt} \tag{8}$$

式中: $A_s = 2hd$, h 是剪切区的高度, d 是剪切区的厚度; γ 为剪应变; L_s 是剪切区的宽度。将式 (2)~(5) 带入式 (6)~(8) 中, 可得:

$$\tau = E \frac{A}{A_s} \varepsilon_T \tag{9}$$

$$\gamma = -\frac{2c_0}{L_s} \int_0^t \varepsilon_R dt \tag{10}$$

$$\dot{\gamma} = -\frac{2c_0}{L_s} \varepsilon_R \tag{11}$$

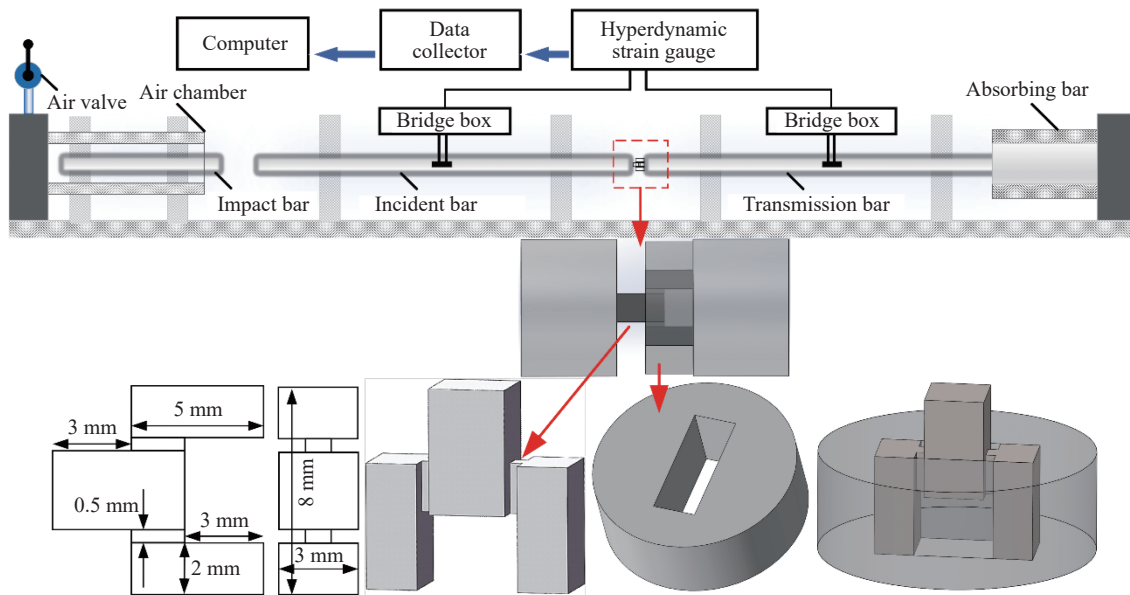


图 9 实验装置示意图

Fig. 9 Experimental device schematic

3 LMD GH4169 的动态剪切力学性能

3.1 静动态剪切曲线

对 LMD GH4169 材料, 利用 DNS 100 电子万能材料试验机进行应变率为 0.1 s^{-1} 准静态压剪实验, 利用分离式 Hopkinson 压杆进行约 10 000、13 000 和 30 000 s^{-1} 三种高应变率的动态剪切实验。对于剪切实验, 试样的剪切宽度准确获得至关重要。但实际试样变形中, 由于剪切带宽度一般不均匀且在微米量级, 目前实时测试剪切宽度难度较大, 加之较难控制不发生最终剪切破坏, 剪切破坏的试样已无法测量实际剪切带宽度。参考文献 [11-12, 15], 采用式 (10) 近似计算剪切应变, 图 10 给出了两种不同取向试样

在不同应变率下的剪切应力-剪应变曲线。

从图 10 中可以看出, 随着应变率由 0.1 s^{-1} 上升到 $30\,000 \text{ s}^{-1}$, LMD GH4169 的两个方向流动应力逐渐增加, 具有明显的应变率强化效应, 但两个方向的剪切流动应力相差不大。随着应变率的增加, 曲线的塑性流动段相对缩短, 说明材料动态剪切变形过程中的失效应变逐渐减小。在 $30\,000 \text{ s}^{-1}$ 应变率下, 材料的应力达到峰值后快速下降没有塑性流动段。这是由于高应变率下, 试样在很窄小的区域发生绝热剪切, 热量来不及扩散, 产生热软化现象, 导致应力急剧下降。

在剪应力-剪应变曲线中, 假设以曲线上应力最大的值表示剪切强度。图 11 为剪切强度随应变率变化曲线, 纵轴为剪切强度, 横轴为对数应变率。从图 11 中可以看出, 随着应变率的增加, z 向的剪切强度由 520 MPa 增加到 780 MPa , x 向的剪切强度由 500 MPa 增加到 820 MPa , 两个方向都具有显著的应变率强化效应。而两组数据在相同应变率下数值并没有发生很大变化, x 向与 z 向的剪切强度相差不是很明显, 并未表现出各向异性。由于各向异性不是很明显, 我们根据散点趋势选用 $y = y_0 + Ae^{Bx}$ 指数模型对两个方向的数据进行曲线拟合, 得到剪切强度关于对数应变率的拟合公式:

$$\tau = 510 + 0.1 \exp[(\ln \dot{\gamma} / \dot{\gamma}_0) / 1.3] \quad (12)$$

式中: $\dot{\gamma}_0$ 是参考应变率, 这里取值为 1 s^{-1} 。所选用拟合方程有三个参数, 可以看出, 在三个参数确定的条件下, 指数拟合曲线能较好的预估剪切强度与对数应变率的关系。

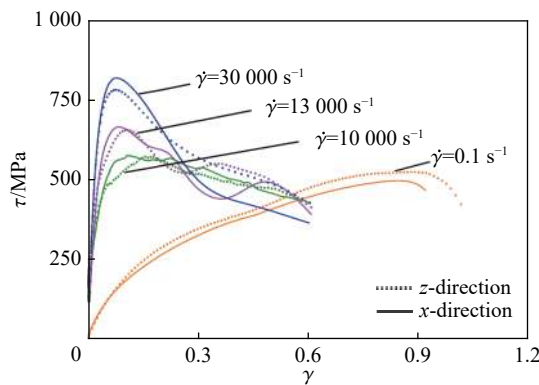


图 10 LMD GH4169 在不同应变率下的剪应力-剪应变曲线

Fig. 10 Shear stress-shear strain curves of LMD GH4169 under different strain rates

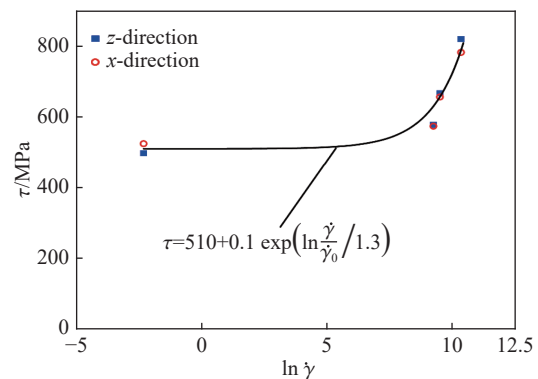


图 11 剪切强度-应变率曲线

Fig. 11 Shear strength-strain rate curve

为了对比 LMD GH4169 材料的压缩力学性能和剪切力学性能, 采用尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的圆柱形动态压缩试样, 通过 SHPB 装置进行不同应变率的动态压缩实验, 得到单轴压缩应力-应变曲线。根据八面体应力、应变状态分析, 简单压缩实验的应力-应变曲线即为广义等效应力-应变曲线。假设材料是处于理想的纯剪切变形状态, 根据 Von Mises 假定:

$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{3}\tau \quad (13)$$

将实验得到的剪应力转化为材料的等效应力, 并由大变形下剪应变与等效应变的关系式^[16]:

$$\varepsilon_{\text{eq}} = \ln \sqrt{1 + \gamma + \gamma^2 / 2} \quad (14)$$

得到材料的等效应变。

图 12 为动态压缩和动态剪切加载实验得到的等效应力-等效应变曲线比较, 可以看出, 在达到屈服点之前, 压缩试样和剪切试样得到的等效应力-等效应变曲线基本重合, 由两种实验得出材料的弹性模量一致, 符合广义等效应力, 即: 是广义等效应变的一个确定函数, 与应力状态类型无关的特点。但随着塑性变形的发展以及绝热剪切带的产生, 在达到屈服点之后, 压缩和剪切状态下得到的等效应力-等效应变曲线出现差异。动态压缩下得到的流动应力曲线有塑性流动段, 曲线往上延伸, 表现出应变硬化特征。而动态

剪切曲线在到达最大应力值后出现下降,这是因为动态剪切塑性变形集中在剪切区内,随着剪切的发展,剪切局域化集中形成极窄的绝热剪切带,在这过程中会产生大量的热并且来不及释放,导致出现剪切失稳,使得应力水平降低。结合等效应力应变曲线结果表明,本文中采用的双剪切试样可以很好地反映材料的剪切特性。

为了评估 LMD GH4169 的动态剪切性能,对比了在室温下不同工艺和不同热处理下制备的 GH4169 合金的剪应力-位移曲线。其中锻造材料和退火热处理数据均来自文献 [11, 17]。由于 LMD GH4169 材料没有明显的各向异性,所以选取 x 向的三组数据,用虚线表示,如图 13 所示。由图中虚线可以再次看出, LMD GH4169 具有明显的应变率强化效应,锻造和退火的 GH4169 合金的最大剪切应力分别为 752 MPa 和 831 MPa,而 LMD GH4169 合金随着应变率的增加,最大剪切应力由 577 MPa 到 818 MPa。整体上该材料的剪切强度低于其余两种传统工艺的材料,但随着应变率的增加,应力峰值的差距逐渐减小。

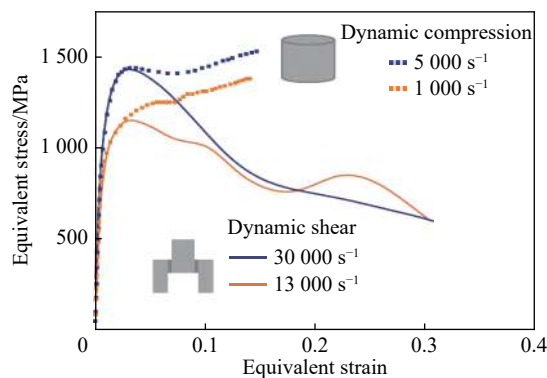


图 12 动态剪切与压缩实验等效应力应变曲线对比
Fig. 12 Equivalent stress-strain curves comparison for dynamic shear and compression testing

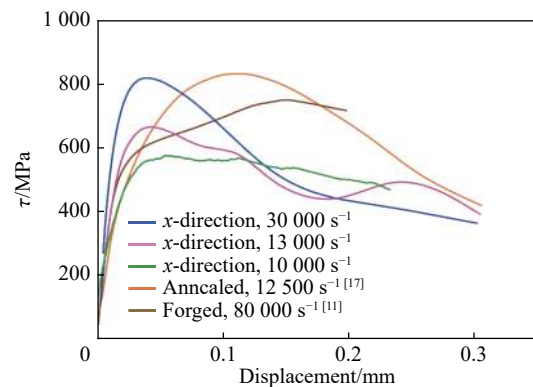


图 13 不同工艺 GH4169 动态剪切力学行为比较
Fig. 13 Comparison of dynamic shear mechanical behaviors of different processes GH4169

3.2 剪切破坏机理分析

为了更好地理解 LMD GH4169 材料在宽应变率范围内的剪切破坏机理,分别对三种应变率(0.1 、 $10\ 000$ 和 $30\ 000\ \text{s}^{-1}$)下破坏后的试样剪切断口侧面和正面进行光学显微镜(OM)和扫描电子显微镜(SEM)观测,如图 14~16 所示。图 14(b)、15(b)和 16(b)所示为剪切断口侧面照片,可以看出,低应变率加载下的剪切断口侧剖面与加载方向的夹角约为 10° ,沿剪切剖面有凹凸不平的起伏。随着应变率升高到 $10\ 000\ \text{s}^{-1}$ 和 $30\ 000\ \text{s}^{-1}$,剪切剖面的平整度分布相比准静态下更加光滑整齐,剪切区域更加窄小,与加载方向的夹角更小。准静态的加载使得剪切区变形发生缓慢,剪切发生相对涉及的区域较为宽大,从侧面表现为沿预设剪切区的对角线扩展。然而在高速加载状态下,剪切区快速进入绝热剪切失稳,剪切断口为平整的剪切滑移面。

图 14(c)~(d)、图 15(c)~(d)、图 16(c)~(d) 分别给出了 LMD GH4169 在 0.1 、 $10\ 000$ 和 $30\ 000\ \text{s}^{-1}$ 加载条件下的断口微观照片,试样断口均呈现出典型的剪切断裂形貌。在准静态加载下,试样断口表面分布有大量很深的韧窝,且沿剪切应力方向倾斜。图 15(c)~(d) 为应变速率为 $10\ 000\ \text{s}^{-1}$ 的剪切断口形貌,发现高应变率剪切变形后的剪切断口表面光滑,沿着柱状晶生长方向有一系列较浅且较小的韧窝,由于方向性,这些韧窝沿枝晶壁分布,沿枝晶壁分布的 Laves 相和碳化物容易引起局部塑性变形和断裂。图 16(c)~(d) 为剪切试样应变率达到 $30\ 000\ \text{s}^{-1}$ 左右的断口微观照片,在很高的应变率下,断口宏观上平整光滑,断口表面分布有大量尺寸更小、深度更浅的剪切型伸长韧窝,同时断口表面局部分布有在高应变率绝热剪切变形中韧窝拉伸变形失效留下的光滑平面。通过断口形貌微观分析,可以看出, LMD GH4169 双剪切试样在不同应变率加载条件下,剪切断口表现出以剪切型伸长韧窝为主导的断口

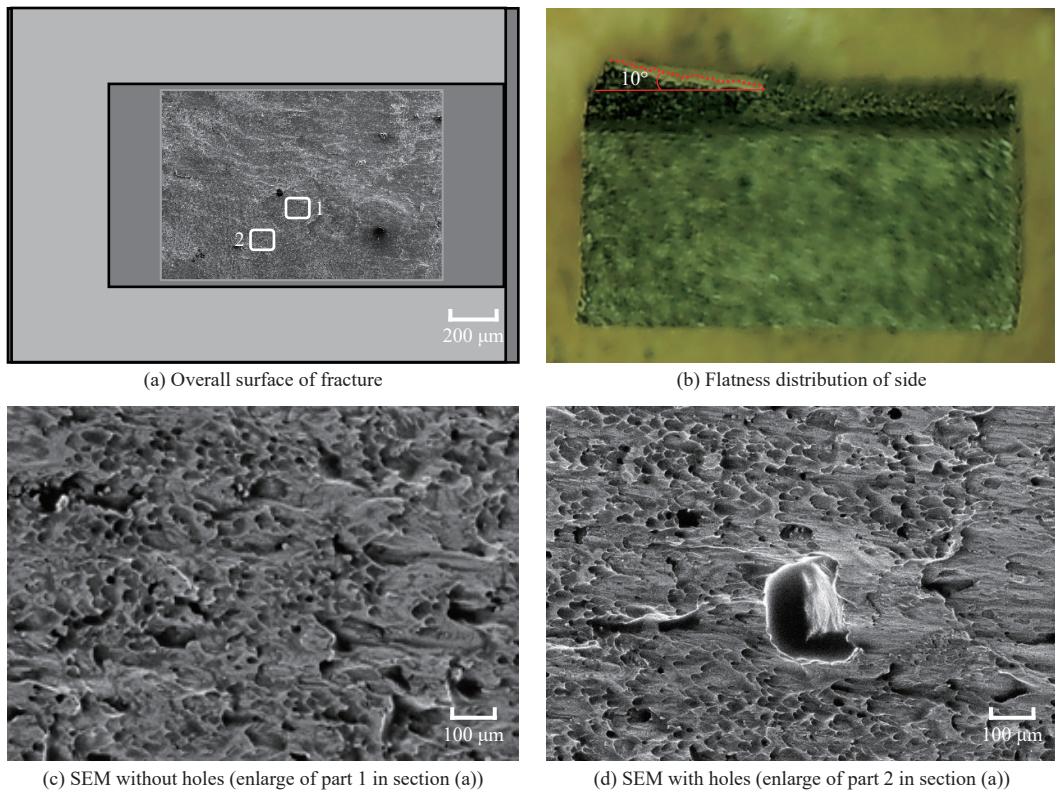


图 14 应变率 0.1 s^{-1} , x 向试样断口形貌

Fig. 14 SEM observations in fracture specimens at the strain rate 0.1 s^{-1} along x -direction

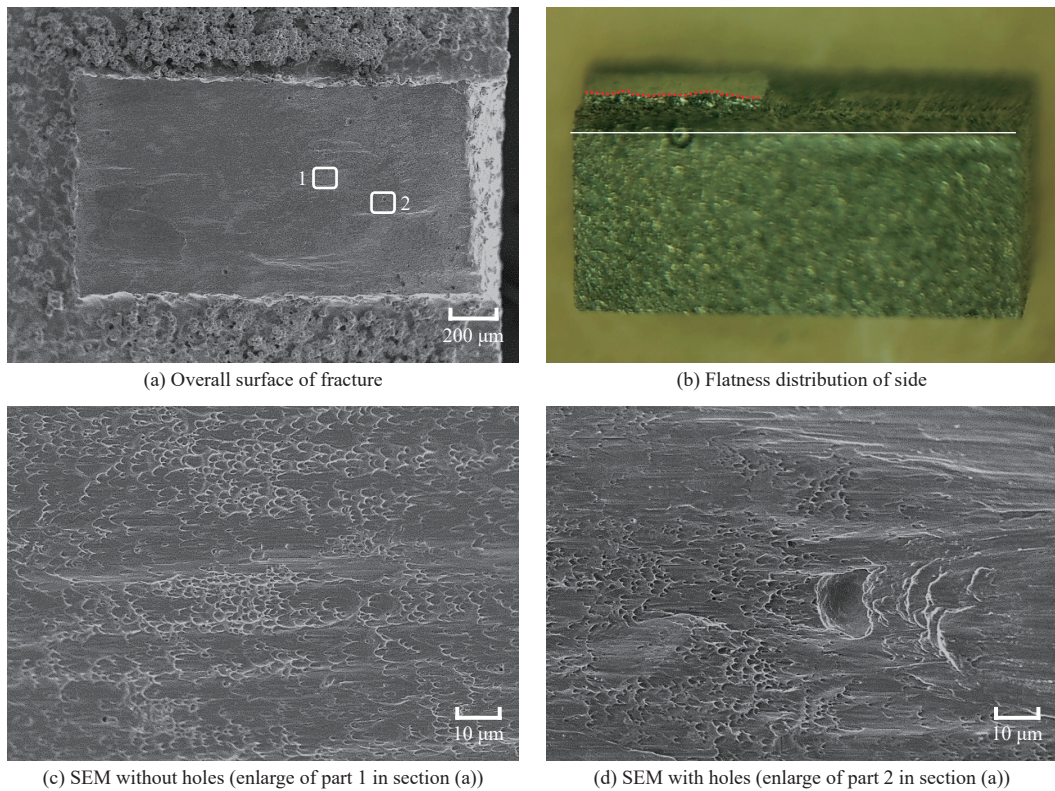


图 15 应变率 $10\,000 \text{ s}^{-1}$, x 向试样断口形貌

Fig. 15 SEM observations in fracture specimens at the strain rate $10\,000 \text{ s}^{-1}$ along x -direction

形貌,表现为以韧性断裂为主的断裂模式。随着应变率升高,断口韧窝尺寸和深度减小,韧性降低,在更小的变形量下容易剪切失效。动态变形过程为绝热过程,LMD GH4169的枝晶结构在动态剪切变形过程中更容易发生绝热剪切失稳。此外,如图14(d)、图15(d)和图16(d)所示,在断口表明均发现有少量包括气孔、孔洞以及未熔融粉末的初始缺陷。初始缺陷的变形表现出一定的应变率敏感性。随着应变率的提高,断口表面上的孔洞缺陷的塑性变形更加剧烈,在孔洞周围形成塑性变形影响区面积增大,孔洞尺寸因塑性变形作用而减小。在 $30\,000\text{ s}^{-1}$ 应变率下,孔洞缺陷周围形成大面积的光滑平面。针对LMD GH4169材料,由于激光金属沉积的特殊加工工艺所造成的初始缺陷参与材料的剪切变形和失效过程,随着应变率的增加,初始缺陷对剪切变形失效的影响逐渐增大。

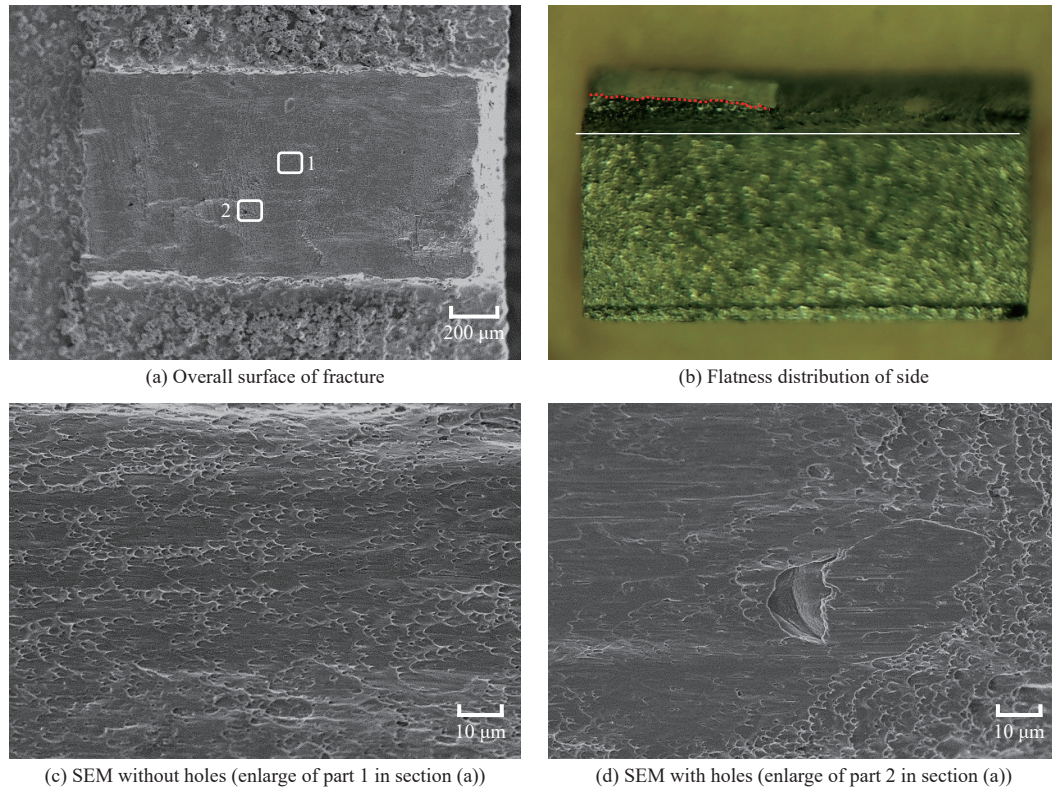


图16 应变率 $30\,000\text{ s}^{-1}$, x 向试样断口形貌

Fig. 16 SEM observations in fracture specimens at the strain rate $30\,000\text{ s}^{-1}$ along x -direction

4 结论

基于数值模拟结果,选取双剪切试样作为实验试样,在分离式Hopkinson压杆上进行动态剪切实验,获得了LMD GH4169材料在不同应变率下的动态剪切响应,得到以下结论:

(1)使用ABAQUS/Explicit进行数值仿真,对比三种试样形式,选取了剪切纯度最高的双剪切试样,并对其不同剪切区宽度分析了应力场的均匀性,最终选取剪切区宽度为 0.5 mm 的双剪切试样;

(2)双剪切试样形式通过尺寸优化后,有效提高了剪切区应力均匀性以及剪切信号的准确性,剪切区域应力分布更接近纯剪切;

(3)LMD GH4169剪切强度在扫描方向和沉积方向上并没有表现出明显的各向异性,随着应变率的增大,LMD GH4169剪切强度增大,具有明显的应变率强化效应;

(4)LMD GH4169表现为剪切型伸长韧窝为主的剪切断裂模式,随着应变率升高,断口韧窝尺寸和深度减小,韧性降低,在很小的变形量下更容易剪切失效,材料初始微观缺陷成为影响动态剪切变形断裂的重要因素。

参考文献:

- [1] BAI Y L, DODD B. Adiabatic shear localization: occurrence, theories, and applications[J]. Oxford University Press, 1992
- [2] WANG Z, GUAN K, GAO M, et al. The microstructure and mechanical properties of deposited-IN718 by selective laser melting [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, 513: 0–523.
- [3] ZHANG D, FENG Z, WANG C, et al. Comparison of microstructures and mechanical properties of GH4169 alloy pro-cessed by selective laser melting and casting [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 724(18): 357–367.
- [4] TROSCHE T, JOHANNES S, RAINER V, et al. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted GH4169 compared to forging and casting [J]. *Materials Letters*, 2016, 164: 428–431.
- [5] QI H, AZER M, RITTER A. Studies of standard heat treatment effects on microstructure and mechanical properties of laser net shape manufactured GH4169 [J]. *Metallurgical & Materials Transactions Part A*, 2009, 40(10): 2410–2422.
- [6] YUAN K, GUO W, LI P, et al. Influence of process parameters and heat treatments on the microstructures and dynamic mechanical behaviors of GH4169 superalloy manufactured by laser metal deposition [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2018, 721: 215.
- [7] LEE W S, LIN C F, CHEN T H, et al. Dynamic shear properties of alloy 718 over wide temperature range [J]. *Materials Transactions*, 2012, 53(10): 1758–1764.
- [8] JOHANSSON J, PERSSON C, LAI H, et al. Microstructural examination of shear localisation during high strain rate deformation of alloy 718 [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2016, 662: 363–372. DOI: 10.1016/j.msea.2016.03.080.
- [9] MURR L E, STAUFHAMMER K P, MEYERS M A, et al. Metallurgical applications of shock-wave and high-strain-rate phenomena [J]. *Metallography*, 1987, 20(2): 249–250. DOI: 10.1016/0026-0800(87)90034-6.
- [10] PEIRS J, VERLEYSEN P, DEGRIECK J, et al. The use of hat-shaped specimens to study the high strain rate shear behaviour of Ti-6Al-4V [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(6): 703–714. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.08.002.
- [11] SONG W D, HU M L, ZHANG H S, et al. Effects of different heat treatments on the dynamic shear response and shear localization in GH4169 alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 725: 76–87. DOI: 10.1016/j.msea.2018.04.010.
- [12] 许泽建, 丁晓燕, 张炜琪, 等. 一种用于材料高应变率剪切性能测试的新型加载技术 [J]. *力学学报*, 2016, 48(03): 143–148. XU Z J, DING X Y, ZHANG W Q, et al. A new loading technique for measuring shearing properties of materials under high strain rates [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(03): 143–148.
- [13] AHMED N, MITROFANOV A V, BABITSKY V I, et al. Analysis of material response to ultrasonic vibration loading in turning GH4169 [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 424(1–2): 318–325. DOI: 10.1016/j.msea.2006.03.025.
- [14] 朱龙权, 朱志武, 张光瀚, 等. 霍普金森试验技术及 6005A 铝合金冲击动态试验 [J]. *成都大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(03): 10–15. ZHU L Q, ZHU Z W, ZHANG G H, et al. Hopkinson experimental technique and 6005A aluminum alloy impact dynamic experimental study [J]. *Journal of Chengdu University(Natural Science Edition)*, 2018, 37(03): 10–15.
- [15] ZHOU T, WU J, CHE J, et al. Dynamic shear characteristics of titanium alloy Ti-6Al-4V at large strain rates by the split Hopkinson pressure bar test [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 109: 167–177. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.06.007.
- [16] CULVER R S. Thermal instability strain in dynamic plastic deformation [M] // *Metallurgical Effects at High Strain Rates*. Boston, MA: Springer, 1973: 519–530. DOI: 10.1007/978-1-4615-8696-8_29
- [17] DEMANGE J J, PRAKASH V, PEREIRA J M. Effects of material microstructure on blunt projectile penetration of a nickel-based super alloy [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(8): 1027–1043. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.01.007.

(责任编辑 王小飞)