

面向剧烈塑性变形的几种挤压成形技术

王 强, 于建民, 薛 勇, 张治民

(中北大学 材料科学与工程学院 国防科技工业复杂构件挤压成形技术创新中心, 山西 太原 030051)

摘要: 为了实现大尺寸块体材料的制备或高性能零构件的成形, 近年来开发了面向剧烈塑性变形的挤压成形技术。总结了近年来开发的扩收挤压、循环镦挤、旋转反挤压这 3 种挤压成形新技术, 分别阐述了其基本原理、工艺过程及变形特点, 介绍了 3 种挤压成形新技术在铝、镁合金材料或典型产品上的应用, 并提出需进一步解决的问题。研究结果和应用实践均表明, 循环镦挤工艺可实现大规格、高质量变形坯料的制备, 扩收挤压工艺可应用于底部带中心孔的大型薄壁筒形零件的成形, 旋转反挤压工艺可实现杯形构件的高性能短流程成形。

关键词: 挤压; 剧烈塑性变形; 扩收挤压; 循环镦挤; 旋转反挤压

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.10.002

中图分类号: TG376.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 10-0012-06

Several extrusion technologies for severe plastic deformation

Wang Qiang, Yu Jianmin, Xue Yong, Zhang Zhimin

(National Defense Innovation Center of Extrusion Forming Technology for Complex Components, College of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To realize the preparation of large-scale bulk materials or the forming of high performance components, the extrusion forming technology for severe plastic deformation (SPD) were developed in recent years, and the three new extrusion technologies, including expanding-reducing extrusion (ERE), repetitive extrusion-upsetting (REU) and rotating backward extrusion (RBE) were summarized in recent years. Then, the basic principle, technological process and deformation characteristics were described, the applications of the three new extrusion technologies in aluminum and magnesium alloy materials or typical products were introduced, and the problems that need to be solved were put forward. The research results and the applied practice show that the REU technology can realize the preparation of large size and high quality deformed billets, the ERE technology are used to form large thin-walled cylindrical parts with center hole at the bottom, and the RBE technology can realize short process forming of cup components with high performance.

Key words: extrusion; severe plastic deformation; expanding-reducing extrusion; repetitive extrusion-upsetting; rotating backward extrusion

剧烈塑性变形 (Severe Plastic Deformation, SPD), 是在变形过程中引入大的应变而制备出超细晶材料的一种技术手段^[1-2]。作为一种新兴的制备成形工艺, 近年来, 剧烈塑性变形技术引起了世界各国科研工作者的极大兴趣, 针对剧烈塑性变形对材料组织性能的影响开展了大量的研究^[3-5], 并已发展了基于轧制、锻造、挤压等的多种剧烈塑性变形方法^[2,6-7]。但通过应变累积来产生大的应变需多次循环变形, 并且大多数情况下只能制备小体积块体材料, 同时对设备要求高,

因此, 减少变形道次, 实现大尺寸块体材料乃至零构件的成形, 是未来剧烈塑性变形发展的趋势和目标。

挤压, 作为有色金属和钢铁材料生产与零件成形加工的主要工艺之一, 是近代金属塑性加工中的一种先进加工方法, 已得到了较为广泛的开发和应用^[2,8-9]。随着挤压技术的应用与发展, 降低挤压成形力、提高变形量和均匀性以及实现复杂形状零件的成形, 成为挤压成形技术的发展方向。

基于剧烈塑性变形和挤压成形技术的发展, 近年来研究了面向剧烈塑性变形的挤压成形技术。本文总结了近年来所开发的扩收挤压、循环镦挤、旋转反挤压成形技术, 阐述了这 3 种挤压工艺的基本原理、工艺过程及变形特点, 分析了现有应用并提出了发展方向。

收稿日期: 2021-10-15; **修订日期:** 2022-01-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51775520)

作者简介: 王 强 (1973-), 男, 博士, 教授

E-mail: wangqiang@nuc.edu.cn

1 扩收挤压工艺

常规采用实心坯料挤压成形圆筒形件、轮盘类构件，但由于底部存在难变形区，变形量小且不均匀，对于诸如车轮等高转速抗疲劳构件，难以满足底部高性能的应用要求。同时，大的接触面积导致大的挤压成形力，而且成形能耗和模具消耗也大。

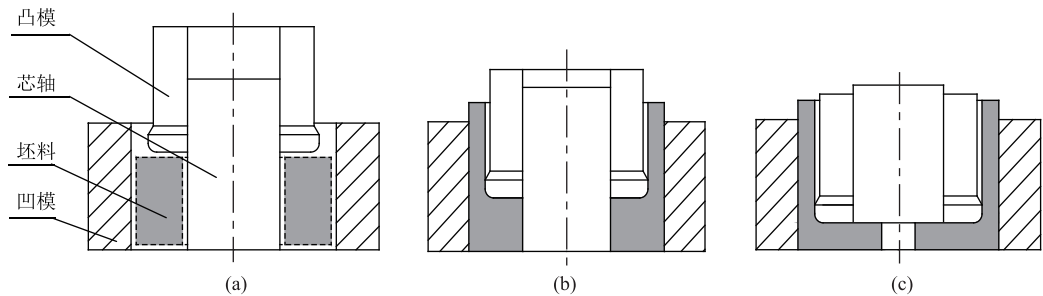


图 1 扩收挤压成形示意图
(a) 反挤压初始状态 (b) 反挤压终了状态 (c) 镦粗收口状态

Fig. 1 Schematic diagrams of expanding-reducing extrusion forming

(a) Initial state of backward extrusion (b) Final state of backward extrusion (c) State of upsetting

采用 Deform-3D 软件对传统挤压和扩收挤压工艺进行数值模拟，重点比较挤压筒形件底部的变形情况，材料选用 7A04 铝合金，工件和坯料的相关尺寸如表 1 所示。图 2 给出了两种挤压方式下铝合金筒形件底部的等效应变和标准偏差（Standard Deviation, SD）对比，结果表明：相比传统挤压，扩收挤压成形的筒形件获得了更大的变形量，其等效应变至少提高了 1 倍，实现了对晶粒细化和微观组织的控制，有利于改善轻合金构件重要承力部位的力学性能。

表 1 挤压模拟工件和坯料的尺寸 (mm)

Table 1 Dimensions of workpiece and blank in simulation of extrusion (mm)

成形方法	工件			坯料		
	内径	外径	底孔直径	外径	内径	高度
传统挤压	Φ485	Φ515	Φ0	Φ510	Φ0	80
扩收挤压	Φ485	Φ515	Φ280	Φ510	Φ400	190

1.2 典型应用

扩收挤压成形技术已应用于铝、镁合金轮盘类构件的成形，如图 3 所示。制造的 7A04 铝合金轮辋（图 3a）的综合力学性能较好，较原钢制产品减重近 60%，已批量应用于某重型车辆并取得良好的轻量化效果^[10]。成形的镁合金负重轮盘（图 3b）

1.1 工艺原理

扩收挤压（Expanding-reducing Extrusion, ERE）成形技术如图 1 所示^[10-11]，即采用带有活动芯轴的凸模，对挤压扩孔制备的空心坯料进行反挤压，而后芯轴退回，对底部进行镦粗收口至所需尺寸，并去除难变形区和改变分流面，以有效提高底部的变形量，同时降低挤压成形力。此工艺可用于底部带中心孔的大型薄壁筒形零件的成形^[2,10-11]。

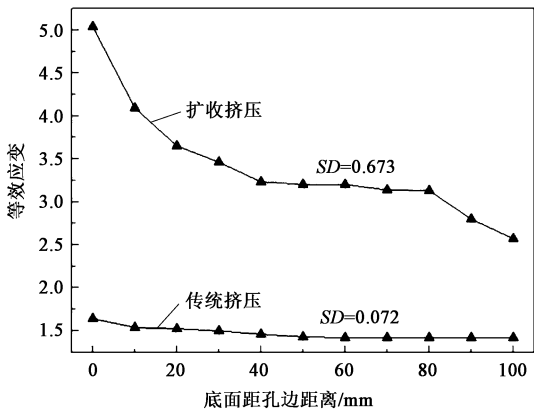


图 2 不同挤压工艺下成形筒形件的底部等效应变对比

Fig. 2 Comparison of effective strains in bottom of formed cylindrical parts under different extrusion processes

通过了实车考核，为通过“以镁代铝”实现装备轻量化提供了重要途径。

2 循环镦挤工艺

通过单独的镦粗或挤压变形，很难获得相对较大的变形量，同时镦粗受棒料高径比、大比率挤压受设备的限制，难以实现大规格、高质量变形坯料的制备，制约了大型构件的高性能成形制造。

2.1 工艺原理

图 4 为循环镦挤（Repetitive Extrusion-upsetting，

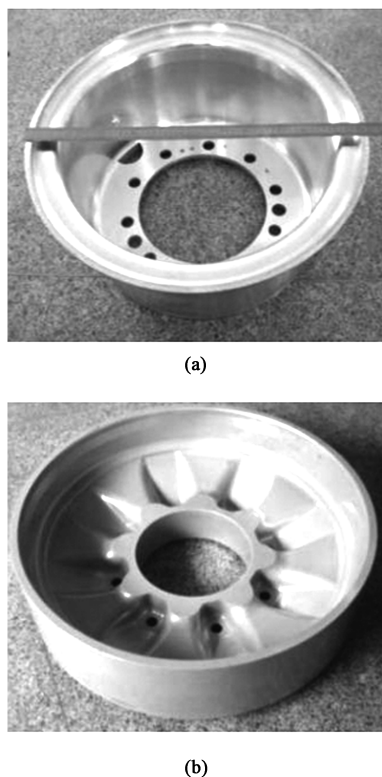


图 3 扩收挤压成形的零件
(a) 铝合金轮辋 (b) 镁合金负重轮盘

Fig. 3 Parts produced by ERE

(a) Aluminum alloy wheel rim (b) Magnesium alloy road wheel

REU) 变形工艺示意图^[12], 即联合镦粗和挤压两种工艺。首先, 通过正挤压将直径为 D 、高度为 h 的棒料变形为直径为 d 、高度为 H 的棒料; 然后, 通过镦粗再将棒料直径由 d 增加至 D , 为保证镦粗后的棒料顺利置于挤压筒内, 镦粗后的直径 D 应稍小于挤压筒直径 D_c ; 如此挤压-镦粗-挤压-……反复变形, 依靠应变累积实现剧烈塑性变形, 获得较单独挤压或镦粗更大的变形量^[2,12]。图 4 中, F_1 为施加的正挤压力, F_2 为施加的镦粗变形力, 坐标轴中 z 表示轴向、 θ 表示径向、 ρ 表示切向。

对于循环镦挤变形, 通过式 (1) 和式 (2) 可分别计算 1 次、循环 n 次的变形量。假设棒料直径 D 与 d 之比为 2 (即挤压比为 4), 则 1 次镦挤变形后的应变为 2.8, 3 次循环镦挤变形后的应变即可达到 8.4。

$$\varepsilon_{VM}/cycle = 4 \ln \frac{D}{d} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{VM} = 4n \ln \frac{D}{d} \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_{VM}/cycle$ 为镦挤 1 次的应变; ε_{VM} 为循环镦挤 n 次的应变; D 为挤压前 (镦粗后) 的棒料直径; d 为挤压后 (镦粗前) 的棒料直径。

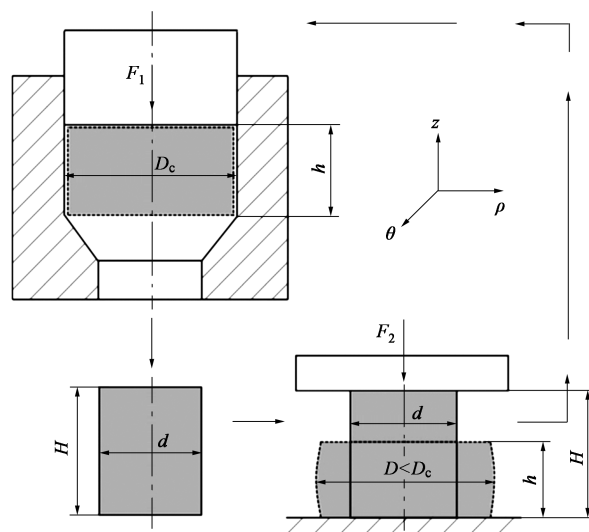


图 4 循环镦挤工艺示意图

Fig. 4 Schematic diagram of repetitive extrusion-upsetting process

2.2 典型应用

针对常规镦粗受棒料高径比限制 (小于 2.8) 的问题, 研究提出了一种大高径比棒料镦粗成形新方法^[13], 可用于高径比为 6.0 的棒料的镦粗, 实现了大高径比、大规格棒料的镦粗变形。联合挤压工艺, 即采用如图 4 所示的循环镦挤工艺可获得大变形, 有利于细化晶粒以获得高的力学性能, 同时弱化变形织构以减小各向异性。如对于尺寸为 $\Phi 410 \text{ mm} \times 2400 \text{ mm}$ 的 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 稀土镁合金铸棒, 通过镦粗-挤压-镦粗-挤压-镦粗的“3 镦 2 挤”变形, 获得应变为 3.80 的总变形量, 1 次镦粗 (挤压) 变形的应变为 0.76, 制备出 $\Phi 600 \text{ mm} \times 1100 \text{ mm}$ 的锭坯, 如图 5 所示, 已成功应用于大构件成形所需的大规格、高质量变形坯料的制备。镦挤变形及循环次数对不同材料的组织均匀性、各向异性的影响有待进一步分析研究。

3 旋转反挤压工艺

反挤压是制造断面为圆形、多层圆形、方形、长方形等空心零件的主要方式之一, 其变形量取决于挤压件内、外形 (截面) 尺寸, 常规变形量相对小且不均匀, 如何在零构件成形的同时提高整体的变形量是研究重点。

3.1 工艺原理

图 6^[14-15] 为开口凸模旋转反挤压 (Rotating Backward Extrusion, RBE) 工艺示意图, 即采用端面开口的凸模 (F_z 为下压载荷、 V_z 为下压速度) 对

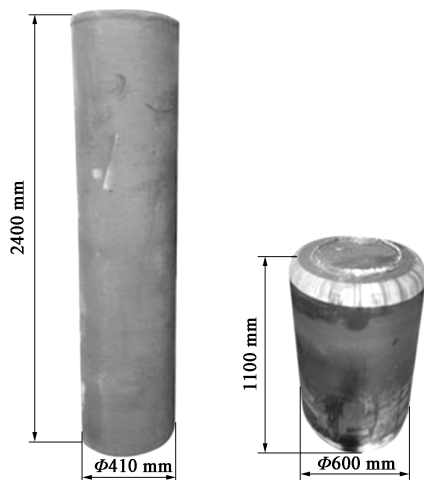


图 5 循环镦挤成形的镁合金棒材

Fig. 5 Magnesium alloy bars formed by REU

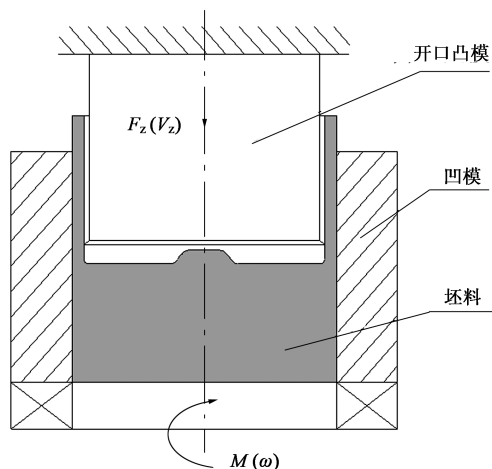


图 6 旋转反挤压工艺示意图

Fig. 6 Schematic diagram of rotating backward extrusion process

旋转变形体 (M 为旋转扭矩, ω 为旋转角速度) 进行反挤压, 并在与凸模端面接触的变形体表面上产生主动摩擦作用, 使变形体同时发生轴向挤压和切向剪切变形^[14-15]。与传统成形工艺相比, 新方法通过挤压和扭转的复合作用对材料施加强力场, 主动摩擦作用产生切向剪切变形, 同时凸模开口形成微区连续累积变形, 单道次剧烈塑性变形, 实现了构

件的高性能短流程成形。

选择 AZ80 镁合金材料, 对外径为 $\Phi 22$ mm、内径为 $\Phi 12.7$ mm 的杯形件旋转反挤压成形进行了数值模拟, 不同旋转圈数下旋转反挤压杯形件的等效应变分布、平均等效应变变化如图 7 和图 8 所示。可以看出, 随着旋转圈数 N 的增加, 试样的平均等效应变值逐渐增大, 同时杯形件内、外壁间的应变

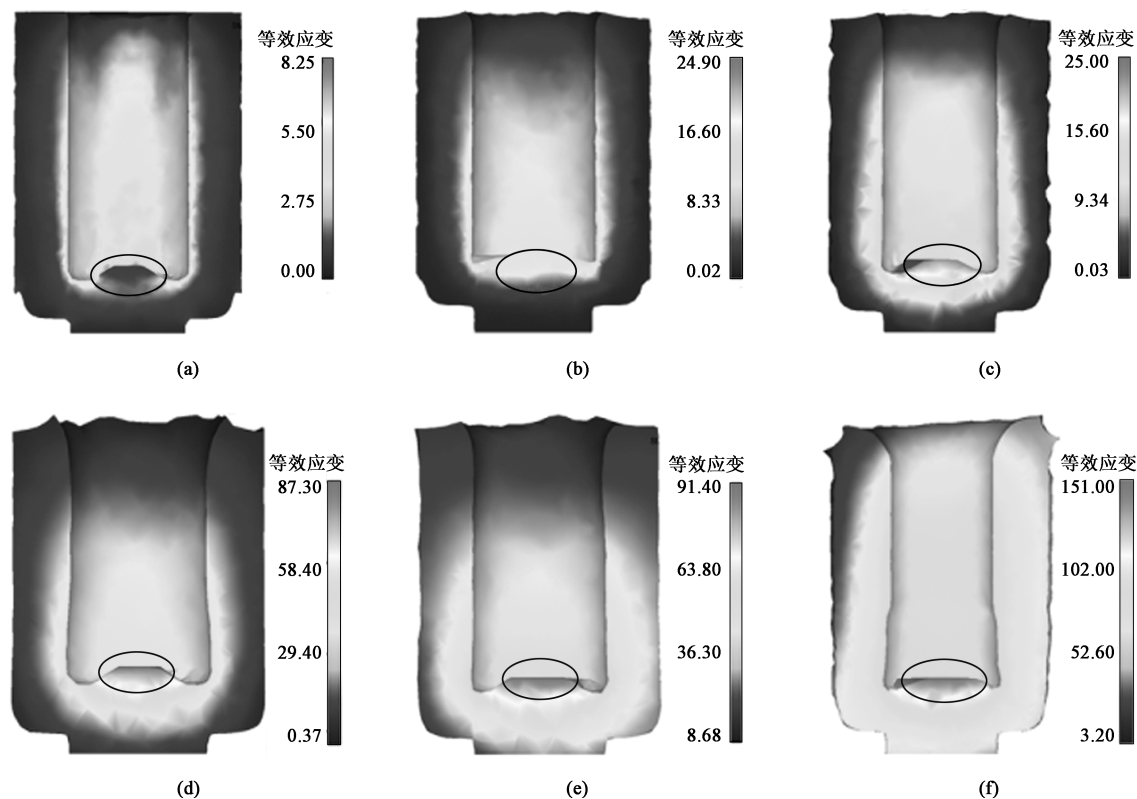


图 7 不同旋转圈数下旋转反挤压杯形件的等效应变分布

(a) $N=0$ (b) $N=5$ (c) $N=10$ (d) $N=30$ (e) $N=50$ (f) $N=100$

Fig. 7 Distributions of effective strain for cup-shaped parts formed by RBE under different rotating cycles

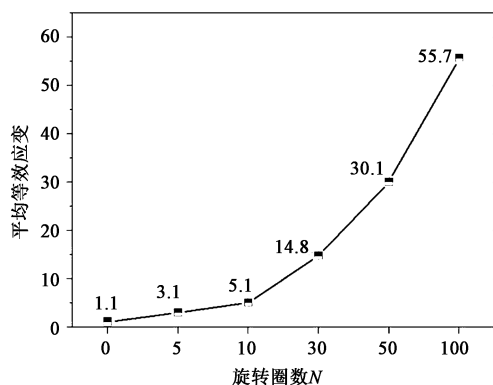


图 8 不同旋转圈数下旋转反挤压杯形件的平均等效应变曲线
Fig. 8 Average effective strain curve of cup-shaped parts produced by RBE under different rotating cycles

差也逐渐减小, 零件整体的等效应变均匀性逐渐提高。表明通过开口凸模的旋转作用能够有效地提高反挤压变形的应变量及变形均匀性。此外, 相较于传统反挤压成形, 旋转反挤压成形中坯料与凸模接触的部位是整个筒形件中等效应变值最大的区

域 (图 7 中实线圈所示), 这是开口凸模旋转反挤压等效应变分布的一个主要特征, 其与开口凸模微区的连续累积剧烈塑性变形有关。

3.2 实验试制

选择 AZ80 镁合金材料, 采用带有数控热扭转单元的 Gleeble-3500 热模拟实验机, 进行了外径为 $\Phi 22$ mm、内径为 $\Phi 12.7$ mm 的杯形件旋转反挤压成形实验, 不同旋转圈数下获得的杯形件如图 9 所示。由图 9 可知, 得到的杯形件的质量完好, 内外表面均无折叠、开裂等缺陷, 同时大变形有利于充分细化晶粒以提高力学性能。分析可以看出, 旋转反挤压新工艺中, 单道次形成剧烈塑性变形并成形出构件, 实现了剧烈塑性变形与构件成形的统一, 可解决如镁合金材料绝对性能低的问题; 同时, 可缩短工艺流程, 降低生产成本。有关旋转反挤压件的微观组织、力学性能的变化, 以及如何实现大尺寸构件的成形等方面, 有待进一步研究解决, 以期推动新技术的应用。

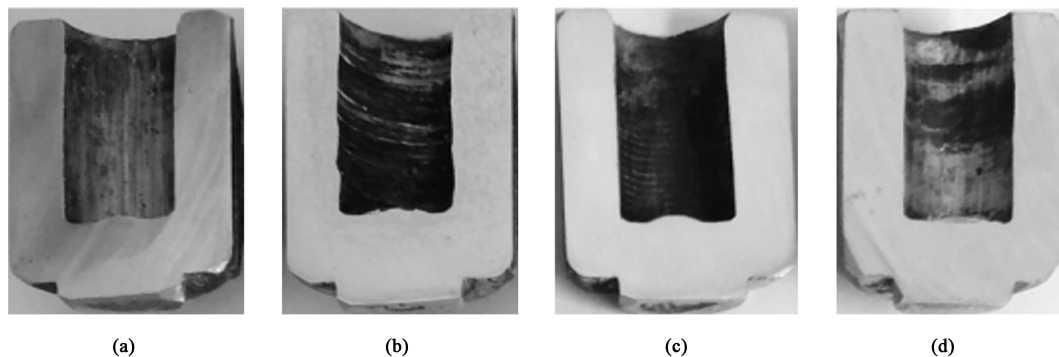


图 9 不同旋转圈数下旋转反挤压的镁合金杯形件

(a) $N=0$ (b) $N=5$ (c) $N=50$ (d) $N=100$

Fig. 9 Magnesium alloy cup-shaped parts formed by RBE under different rotating cycles

4 结论

(1) 扩收挤压工艺实现了筒形件底部难变形区的去除和分流面的改变, 有效地提高了筒底部变形量并降低了挤压成形力, 可应用于底部带中心孔的大型薄壁筒形零件的成形。

(2) 循环镦挤工艺结合大高径比棒料镦粗新方法, 有利于细化晶粒以提高力学性能, 同时弱化变形组织以减小各向异性, 可应用于大规格、高质量变形坯料的制备。

(3) 旋转反挤压工艺通过主动摩擦作用产生剪切变形, 以及凸模开口形成微区连续累积变形, 实

现剧烈塑性变形与构件成形的统一, 可用于杯形件的高性能短流程成形。

参考文献:

- [1] Valiev R Z, Islamgaliev R K, Alexandrov I V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation [J]. Progress in Materials Science, 2000, 45 (2): 103-189.
 - [2] 王强, 薛勇, 于建民, 等. 基于挤压的剧烈塑性变形技术 & 发展 [J]. 中北大学学报: 自然科学版, 2022, 43 (1): 1-10, 18.
- Wang Q, Xue Y, Yu J M, et al. Research and development of severe plastic deformation based on extrusion [J]. Journal of North University of China: Natural Science Edition, 2022, 43 (1): 1-10, 18.

(下转第 22 页)