

# 医用镁合金的多环境耦合平台搭建及其失效行为研究

薛宇阳 黄鞠 房梦飞 夏小鹏 单金龙

江苏省先进结构材料与应用技术重点实验室 南京工程学院, 江苏南京, 211167;

**摘要:** 近年来医用镁合金在医学上获得了广泛应用, 因其良好生物相容性, 常作为植入物应用于临床治疗。目前对镁合金的体外模拟降解研究主要集中于静态环境下降解, 这与实际生理环境中的动态载荷条件存在显著差异。为了更好地理解镁合金在复杂环境下的表现, 本项目搭建一个多环境耦合平台, 以模拟更接近实际人体内生理条件的实验环境, 对其失效行为进行研究。

**关键词:** 医用镁合金; 多环境耦合平台; 降解行为

**DOI:** 10.69979/3041-0673.25.07.042

镁及镁合金具有良好的力学性能和生物相容性。Mg 参与多种蛋白质合成, 多种酶的激活等, 因此镁合金在医学上有着广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。镁合金由于其生物相容性和类似于骨骼的密度, 弹性模量, 屈服强度等<sup>[3]</sup>, 被用作制造骨植入物, 如骨板、螺钉和螺栓等。而镁合金在植入人体后, 其与人体内体液会发生化学反应, 人体内含有大量的侵蚀性离子如氯离子、磷酸氢根离子、硫酸根离子等, 这些离子会加速镁合金的降解, 而镁合金表面的氧化膜往往疏松多孔, 难以提供有效的保护<sup>[4,5]</sup>。因此模拟镁合金在人体液中的失效行为对于研究镁合金在人体内的降解规律有重要意义。

## 1 实验材料及方案

本项目使用商用的 AZ31B 镁合金, 腐蚀用的溶液选择 SBF 模拟体液。为了能够实现对医用镁合金的动态降解实验需求, 搭建一个多环境耦合平台来实现对人体环境的模拟, 同时能够控制其中的一些变量进行对照实验。

为了模拟人体环境, 整个实验过程在如图所示的环境箱中进行, 样品通过夹具固定在箱体中间, 长度为 60mm。

环境箱温度通过加热装置连接温度控制传感器等, 控制误差在  $\pm 1^\circ\text{C}$  内。

人体温度为  $37^\circ\text{C}$  左右, 因此设置  $32^\circ\text{C}$ ,  $37^\circ\text{C}$ ,  $42^\circ\text{C}$  进行对照试验, 以冠状动脉为例, 其血流速度约为每秒 20 至 40cm, 设立  $0\text{cm/s}$ 、 $20\text{cm/s}$ 、 $30\text{cm/s}$ 、 $40\text{cm/s}$  的流速进行对照试验, 应力均施加为 50mpa, 均浸泡 120h, 每 24h 测量一次 pH 值, 更换溶液, 并计算其失重率及平均腐蚀速率。

试样的表面形貌和化学成分通过德国 Merlin Compact 型场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察, 从而了解试样表面的腐蚀情况和形貌变化。在降解实验之后, 采用拉伸实验机进行力学拉伸实验评估材料的力学性能。测试时采用的拉伸速度为  $2\text{ mm/min}$ 。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 温度对镁合金动态降解的影响

将 AZ31B 镁合金在动态环境中不同温度下降解 120h, 采集了溶液的 pH 值数据, 以及失重率和平均腐蚀速率, 数据如图 1 (a) (b) 所示

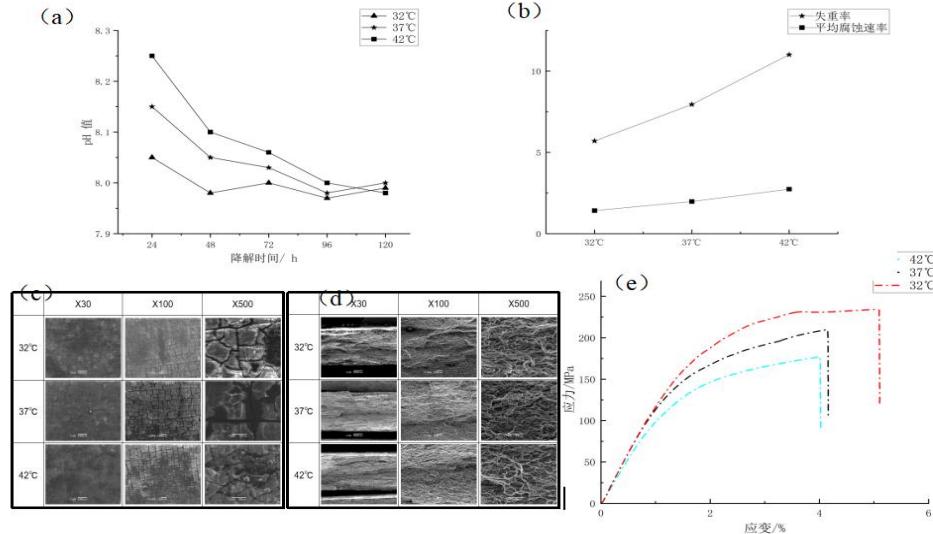


图1 (a) 不同温度下 pH 值随动态降解时间的变化  
(b) 失重率与腐蚀速率 (c) 样品降解后的表面微观样貌  
(d) 动态环境中不同温度下降解后的断口形貌 (e) 动态环境中不同温度下降解后的应力应变曲线

在降解了 24h 时, 不同温度下的模拟体液 pH 值都达到了最高点, 随后逐渐下降, 可看出温度的变化对镁合金前期的降解速率有显著的影响。并且结合失重率, 温度的提高明显加快了镁合金的腐蚀速率。

样品动态降解后的微型样貌如图可看出从表面的腐蚀程度可直观看出随着温度的上升镁合金腐蚀速率显著提高。

如图 1(e) 所示为不同温度下降解后的应力应变曲线。32℃时, AZ31B 镁合金的抗拉强度为 234.2 MPa, 37℃时, 下降至 209.6 MPa, 42℃时, 抗拉强度下降至 176.8 MPa, 材料的强度明显降低。在 32℃时, AZ31B 镁合金的最大延伸率为 5.10%, 在 37℃和 42℃时, 最大延伸率分别降至 4.15% 和 4.02%, 说明在高温条件下, 镁合金的某些部分发生了局部软化或相变, 使得材料在断裂前能够经历更多的塑性变形。

图 1(d) 为动态环境中不同温度下降解后的断口形貌, 可以观察到不同温度下 AZ31B 镁合金的微观结构发

生了显著变化。从 32℃的断口呈现出纤维状或网状的特征, 到 37℃时尽管仍然可以看到一些纤维状结构, 但连续性和完整性受到了影响。当温度进一步升高至 42℃时, 断口纤维状结构几乎完全消失, 呈现出更加不规则的、破碎状的微观结构。这种形貌通常与脆性断裂相关联, 表明在高温下, 材料更容易发生脆性断裂。这与应力应变曲线的表现高度一致。

## 2.2 动态降解过程中溶液流速对 AZ31B 的失效行为影响

### 2.2.1 溶液流速对 AZ31B 组织演变的影响

将 AZ31B 镁合金在动态环境中不同流速下降解 120 h, 所得出的数据和形貌图如 2 所示。由图 2 可看出各流速下的溶液 pH 值在 24h 时都来到最高, 并随后缓慢下降趋于稳定, 其中流速最高的一组, 其 pH 值始终最高, 并且其失重率也为最高, 可分析出其与 SBF 模拟体液反应最多, 即高流速条件促进了镁合金的降解反应。而在初始阶段, 流速为 20cm/s 的条件下, 溶液的 pH 值略低于无流速的条件。在低流速的条件下, 镁合金表面形成的腐蚀产物层可能在一定程度上能够减缓了腐蚀反应的速度。随流速继续增加, 冲刷掉表面的腐蚀产物则加速了反应速度, 符合 pH 值折线图及失重率。

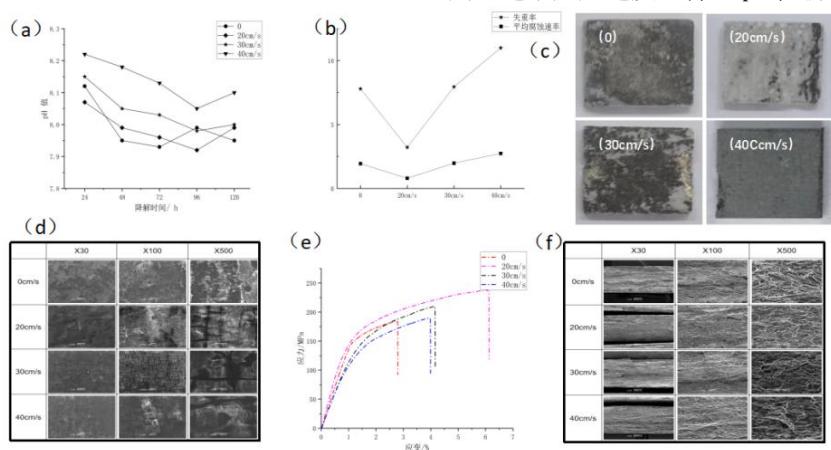


图 2 (a) 不同流速下 pH 值随动态降解时间的变化  
(b) 失重率与腐蚀速率 (c) 不同流速下降解后的宏观形貌 (d) 不同流速下降解后的微观形貌 (e) 不同流速下降解后的应力应变曲线 (f) 动态环境中不同流速下降解后的断口形貌

样品动态降解后的宏观形貌如图 2 (c) 所示, 流速为 0 时, 虽然没有冲刷作用, 样品本身所承受的应力仍然对样品产生了显著影响, 腐蚀产物在样品表面堆积,

形成一层较为致密的腐蚀层, 可以一定程度上减缓腐蚀, 但在应力作用下产生开裂后, 点蚀现象仍然使得其产生了相当的腐蚀。20cm/s 时可以发现流体的冲刷作用开始显现, 这种轻微的冲刷冲刷掉了部分腐蚀产物, 同时应力导致样品表面开裂而产生点蚀现象。随着流速的增加, 流体的冲刷作用更为明显, 表面几乎无腐蚀产物残留, 同时氧化膜难以形成或维持, 加速了腐蚀过程。

样品动态降解后的微观形貌如图 2 (d) 所示。在 0

cm/s的条件下,腐蚀产物在样品表面无序积累。当流速达到20cm/s时,腐蚀产物的分布变得均匀,这在一定程度减缓了腐蚀。流速30cm/s时,流体的冲刷作用明显,腐蚀产物被剥离,局部产生了剥落。流速40cm/s时,局部腐蚀产物几乎全部剥落。此时腐蚀可能以机械冲刷腐蚀为主导。

### 2.2.2 溶液流速对AZ31B力学性能的影响

如图2(e)所示,流速条件为0时,样品的抗拉强度为183.4MPa,此时最大延伸率为2.79%,这一数值远低于其他流速条件下的样品。由此可以推断,当溶液处于无流速的状态时腐蚀介质与材料表面的接触时间更长,容易导致局部腐蚀加深,形成缺口和不规则腐蚀形态。这种不均匀的腐蚀会削弱材料的结构完整性,导致在受到外力时容易产生应力集中,进而降低材料的力学性能。因此,在受到相同的应力时,流速为0的材料表现出较低的力学性能。流速为20cm/s时,抗拉强度达到了237.9MPa,此时抵抗变形能力明显增强。最大变形量为6.12mm,延展性显著提高,适当的流体冲刷使得材料腐蚀减缓且腐蚀更加均匀,减少了应力集中的情况。随着流速的继续增加,材料的抗拉强度和最大变形量虽然仍高于静态条件,但相比低流速(20cm/s)时有所下降。

图2(f)为微观的断口形貌。随着速度的增加,断口形貌呈现出一些明显的变化。在20cm/s时,断口呈现出相对平滑均匀的形貌。这表明在这些速度下,材料的断裂过程相对平稳,没有明显的瞬间断裂或冲击导致的破坏。随着流速增加,可以观察到断口形貌开始出现一些不规则和粗糙的特征。这表明流速对镁合金的力学性能直接影响较小,但会影响腐蚀的均匀性,从而影响材料的力学性能。

### 2.2.3 动态环境中不同流速下AZ31B的失效机理分析

由实验可分析出AZ31B镁合金在动态环境中的失效机理与流速密切相关。在流速为0cm/s的条件下,AZ31B镁合金容易遭受不均匀的腐蚀。腐蚀介质在材料表面长时间停留,加剧了局部腐蚀,导致材料整体结构的削弱和力学性能的显著下降。应力的施加使得原本可能形成保护层的腐蚀产物被破坏,加剧了腐蚀的不均匀性,为后续的应力集中和材料断裂埋下隐患。当流速增加到20cm/s时,低流速的溶液轻轻冲刷镁合金表面,有助于移除疏松腐蚀产物,并促进致密的氧化膜或腐蚀产物层的形成。这层保护膜在一定程度上隔绝了镁合金基体

与腐蚀介质的直接接触,从而减缓了腐蚀进程,优化了材料的力学性能,达到最佳状态。30cm/s时,中等流速的水具有更强的冲刷能力,逐渐破坏在低速时形成的保护膜,使新鲜的镁合金表面不断暴露,导致腐蚀速率略有上升。同时,由于保护层的逐渐流失,材料的力学性能也开始下滑。在40cm/s的高流速下,强烈的冲刷作用在很大程度上破坏了镁合金表面的保护层,使基体直接暴露在恶劣的腐蚀环境中。这种情况下,腐蚀速率急剧上升,过高的流速导致材料表面的微观结构发生变化,引发冲刷腐蚀,这种复合腐蚀形式会进一步影响材料的力学性能。

## 3 结论

通过以上研究得出的主要结论如下:

动态环境中温度对失效的影响:随着温度的升高,镁合金与腐蚀介质的化学反应速度加快,导致更严重的腐蚀。在高温条件下,镁合金的机械性能大幅下降,增加了材料脆性断裂的风险。

动态环境中流速对失效的影响:适当的流速有助于移除腐蚀产物,促进保护层的形成,从而减缓腐蚀。然而,过高的流速会破坏保护层,使镁合金基体直接暴露在腐蚀介质中,导致腐蚀速率急剧上升。

## 参考文献

- [1] 宋丽芸,阿那日,刘洋等.可降解镁锌合金支架材料加工改性方法的研究进展[J].表面技术,2023,52(08):129-141.
- [2] 李晋香,喻正文,张剑.镁合金生物材料在动物体内的实验研究进展[J].黑龙江医学,2023,47(15):1916-1918.
- [3] 周海丽.医用镁合金表面复合涂层的构建及其腐蚀和生物性能研究[D].暨南大学,2020.
- [4] 朱同贺,陈思浩,楼建中,等.聚乳酸/硅橡胶复合富氧膜的制备与性能[J].硅酸盐通报,2014,33(12):3304-3309.
- [5] 谢阳江,陈恩涛,吴波,等.生物可吸收材料在关节骨折内固定中的生物相容性[J].中国组织工程研究,2016,20(34):5076-5081.

基金项目:南京工程学院研究生科技创新基金项目(TB202417021)。