

材料力学实验室环境温湿度控制对实验结果的影响及补偿策略

范义凯

上海振华重工(集团)股份有限公司长兴分公司 上海 201913

摘要: 本文聚焦材料力学实验室环境温湿度控制对实验结果的影响及补偿策略。先阐述温湿度对金属、高分子、复合材料力学性能的影响,分析其对实验结果的影响机制与规律。接着指出实验室温湿度控制现状与问题,如标准执行差异、管控不均等。最后提出差异化控制标准、全流程控制策略及实验误差补偿方案,为提升材料力学实验准确性提供理论支撑与实践指导。

关键词: 材料力学实验室; 温湿度控制; 实验结果影响; 力学性能

引言: 在企业内部材料力学实验室中,主要针对公司大型钢结构(如岸边集装箱起重机、钢桥、浮吊)所使用的钢材、焊材以及焊接件开展材料力学实验分析,实验项目涵盖拉伸、冲击、弯曲、硬度等,并不涉及高分子材料。材料力学实验是精准把握材料性能、保障大型钢结构质量的关键手段,实验结果的准确性直接关系到结构与可靠性。而实验室环境温湿度作为重要影响因素,对钢材等材料的力学性能有着显著作用,进而影响实验结果。当前实验室温湿度控制存在一些问题,深入探究其影响机制并制定相应策略很有必要。

1 温湿度对材料力学性能的影响研究进展

1.1 金属材料

温湿度对金属材料力学性能的影响研究已形成体系。低温环境下,多数金属晶格振动减弱,位错运动阻力增大,屈服强度和抗拉强度显著提升,但塑性和韧性随之下降,如低碳钢在-100℃时抗拉强度较室温提升40%以上,而断后伸长率降至室温的30%。高温环境中,金属易发生蠕变和应力松弛,晶界扩散加剧导致强度降低^[1]。湿度对金属的影响主要通过电化学腐蚀实现,潮湿环境中金属表面形成水膜,加速阳极溶解,降低力学性能,碳钢在相对湿度80%以上环境中放置6个月,抗拉强度下降15%~20%。近年研究聚焦于极端温湿度耦合下的性能演变,通过分子动力学模拟揭示晶格缺陷与环境因子的作用路径,为特殊环境用金属材料选型提供理论支撑。

1.2 焊接材料

焊接材料对焊缝金属性能起决定性作用,且对温湿度敏感。温度上,焊接热循环高温阶段,合金元素与母材发生冶金反应,影响焊缝组织结构。如低碳钢焊接,

高温使铁素体转奥氏体,冷却速度不同形成珠光体等不同组织,影响焊缝强度与韧性;低温时,焊接接头残余应力因热胀冷缩增大,可能致焊缝裂纹,降低力学性能。湿度方面,潮湿环境里,空气水分在电弧高温下分解产生氢气,融入焊缝易引发氢致裂纹,降低塑性与韧性。近年研究人员通过优化焊接材料成分和工艺,如添加吸氢元素、用低氢型焊条等,降低湿度对焊接质量的影响。

1.3 焊接件力学性能

焊接件力学性能受温湿度影响大,且与焊接工艺、母材特性紧密相关。温度升高,残余应力因热膨胀重新分布,致焊接变形增大,影响尺寸精度与承载能力,高温还会使接头组织软化,降低强度硬度,如高温下焊缝金属晶粒长大致强度下降;低温时,焊接件韧性降低、脆性增加,易脆断。湿度主要影响腐蚀,潮湿环境加速电化学腐蚀,在焊缝表面形成产物,降低有效承载面积、削弱力学性能,海洋等高湿高腐蚀场合问题更突出。近年采用耐候钢、表面防护处理等措施,可有效提升焊接件在温湿度环境下的力学性能。

2 温湿度对材料力学实验结果的影响机制与规律

2.1 温度对实验结果的影响

温度对材料力学实验结果的影响通过微观结构变化和宏观力学响应的传导实现,具有明确的规律性。对于金属材料中的钢板、锻件等晶体材料,温度升高使晶格振动能量增强,位错滑移阻力降低。实验测得的屈服强度和抗拉强度随温度升高呈线性下降,且下降速率与材料熔点正相关,熔点越高的材料,强度对温度变化越不敏感。例如,钨的熔点极高,在1000℃时抗拉强度仍保持室温的70%以上;而熔点相对较低的铅,在100℃时抗

拉强度仅为室温的40%。温度还影响实验过程中的应力应变曲线形态,高温下材料应力应变曲线的屈服平台缩短甚至消失,低温下则呈现明显的脆性断裂特征^[2]。

2.2 湿度对实验结果的影响

湿度对材料力学实验结果的影响以界面作用和分子渗透为核心机制,不同类型材料呈现差异化规律。对于钢材,高湿环境引发表面腐蚀,形成腐蚀产物层,实验时腐蚀层易率先开裂,导致拉伸强度测量值偏低,且湿度越高,腐蚀速率越快,测量误差越大,相对湿度80%时碳钢拉伸强度测量误差达8% - 10%。对于焊材,潮湿环境会使焊材表面吸附水分,在焊接过程中产生氢气孔等缺陷,降低焊缝的致密性,进而影响其力学性能,导致拉伸、弯曲等实验结果偏差增大。对于焊接件,湿度导致焊缝处树脂基体(若有涂层等情况)溶胀,破坏焊缝与母材的界面粘结,使层间剪切强度实验值降低,且降低幅度随湿度升高呈指数增长。

2.3 温湿度交互影响

温湿度交互作用对材料力学实验结果的影响呈现协同或拮抗效应,机制较单一因素更为复杂。协同效应表现为温湿度共同作用使性能变化幅度大于单一因素叠加,如钢材在较高温度、高湿环境下,高温加速水分子的渗透,同时水分降低钢材的电极电位,加剧电化学腐蚀,使拉伸强度下降幅度远大于单一高温或高湿环境下的下降幅度。拮抗效应主要出现在部分金属材料中,如不锈钢在低温、高湿环境下,低温抑制电化学腐蚀速率,其抗拉强度下降幅度小于单一高湿环境下的下降幅度。温湿度交互影响还存在阈值效应,当温度低于某一值时,湿度对实验结果影响微弱,如碳钢焊接件在-40℃时,相对湿度从40%升至90%,拉伸强度测量值仅变化2% - 3%;而温度高于50℃时,相同湿度变化导致拉伸强度下降18% - 20%。明确交互影响规律是提升实验准确性的关键。

3 材料力学实验室温湿度控制现状与问题

3.1 现有控制标准与执行情况

我国材料力学实验室温湿度控制已形成基础标准体系,GB/T 228.1-2021规定金属材料拉伸实验环境温度为10℃~35℃,相对湿度不大于80%;针对焊材实验,JB/T 6963-2007明确低氢型焊条力学性能测试环境温度需控制在20℃±2℃,相对湿度50%±10%,酸性焊条实验温度15℃~30℃,相对湿度不大于75%;复合材料实验多参照GB/T 30765-2014,温度23℃±2℃,相对湿度50%±5%。部分行业制定更严苛标准,航空航天领域金属材料实验温度控制精度提升至±0.5℃。执行情况呈现两极分

化,科研院校重点实验室配备精密空调和温湿度监控系统,采用实时数据记录和反馈调节,温度控制精度可达±0.3℃,相对湿度±2%,执行符合标准要求^[3]。但中小型企业及基层实验室存在明显不足,约40%实验室仍使用普通空调调节温湿度,温度波动幅度达±5℃,相对湿度波动±15%,部分实验室未配备连续监控设备,仅通过人工定时记录数据,存在数据造假风险。部分特殊材料实验未执行专用标准,如低温焊材冲击实验仍采用常温标准,导致实验结果偏差,无法真实反映焊材在低温工况下的韧性水平。

3.2 核心管控问题

材料力学实验室温湿度管控存在多方面核心问题,首先是区域管控不均,多数实验室采用整体空间温湿度控制模式,未根据实验类型划分专属区域,金属低温实验区与焊材预处理区共用空间,焊材需在低湿环境(相对湿度≤50%)预处理以去除药皮水分,而低温区为保障制冷效率常伴随高湿,导致焊材预处理效果失效,药皮吸湿率超标,后续焊接实验中氢致裂纹发生率提升,不同区域温湿度相互干扰,使实验数据重复性下降,同一材料在不同时段实验的拉伸强度偏差达5%~8%。其次是动态调控滞后,现有控制系统响应时间普遍在5~10分钟,当实验室人员流动频繁或设备发热导致温湿度突变时,系统无法及时调节,如多台拉伸试验机同时运行时,环境温度可在30分钟内升高4℃,超出标准范围。再者是校准维护缺失,约35%实验室的温湿度传感器每年未进行校准,传感器误差达±1℃和±5%,部分精密空调使用超过5年未更换滤网和制冷剂,制冷除湿效率下降30%以上。最后是人员操作不规范,部分实验人员未等待温湿度稳定即开始实验,材料预处理阶段未在标准环境下放置足够时间,进一步加剧实验误差。

4 材料力学实验室温湿度精准控制与补偿策略

4.1 差异化温湿度控制标准构建

差异化温湿度控制标准构建需基于材料类型、实验项目和应用场景精准划分。金属材料方面,按实验类型细分,常温拉伸实验设定温度23℃±1℃、相对湿度40%~60%;低温拉伸实验根据材料牌号分级,铁素体钢设定-20℃±0.5℃、相对湿度≤40%,奥氏体钢设定-196℃±1℃、相对湿度≤30%;高温蠕变实验按温度范围分级,200℃以下设定±1℃精度,200℃以上提升至±0.5℃精度,相对湿度统一≤50%。焊材按类型与实验项目细分,低氢型焊条拉伸、冲击实验设定温度20℃±0.5℃、相对湿度40%~50%,烘干后保温存储区温度保持100℃~150℃、相对湿度≤30%;酸性焊条实验

温度 $18^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度45%~65%；焊剂力学性能测试温度 $23^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $50\%\pm 3\%$ ，且需单独设置焊材存储区与实验区，避免交叉污染。复合材料按增强相类型细分，碳纤维复合材料实验温度 $23^{\circ}\text{C}\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $50\%\pm 2\%$ ；玻璃纤维复合材料实验温度 $23^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度45%~55%。同时配套建立标准验证机制，通过同一材料在不同标准下的实验对比，确保标准科学性。

4.2 全流程控制策略

全流程控制策略贯穿实验前、中、后全阶段，以精准管控温湿度。实验前开展预处理管控，设材料预处理专属舱，依材料类型设定温湿度参数。金属材料预处理不少于4小时；焊材分级管控，低氢型焊条用专用烘干箱（ $350^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ，保温1-2小时）处理后，立即转保温舱（ $120^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $\leq 30\%$ ）存放，且预处理至实验间隔不超4小时；酸性焊条在标准温湿度环境预处理不少于2小时，预处理舱配备独立温湿度控制系统，精度达 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 1\%$ 。实验中采用分区管控，将实验室划分成金属常温、高低温区，焊材专属实验、存储区。各区域配独立精密空调与气流组织系统，金属高低温区用恒温恒湿机组结合液氮辅助制冷，实现 $-196^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$ 调控；焊材实验与存储区用低湿精密空调配除湿转轮，气流下送上回防局部波动；其他区域用变频精密空调，通过PID算法实时调温湿度，响应时间缩至2分钟内。同时实时监控，各区域布置3个以上传感器，每分钟采样，数据经中央控制系统集成显示，超阈值自动报警调节。实验后实施样品存储管控，存储区温湿度与实验区一致，防样品性能变化，保后续检测数据准确。

4.3 实验误差补偿方案

实验误差补偿方案基于温湿度偏差与实验结果的量化关系建立，实现误差精准修正。首先构建误差数据库，针对常用材料开展不同温湿度偏差下的对比实验，例如碳钢在 23°C 基础上，每升高 1°C ，抗拉强度下降

0.8%，每降低 1°C ，抗拉强度提升0.7%；低氢型焊条在 20°C 基础上，每升高 1°C ，冲击韧性下降1.2%，每降低 1°C ，冲击韧性提升0.9%；相对湿度每超出标准值5%，焊缝拉伸强度下降3.5%，将这些量化关系录入数据库。实验时若温湿度出现偏差，系统自动调用数据库数据，计算误差值并进行补偿^[4]。例如碳钢实验时温度实际为 25°C ，较标准值升高 2°C ，根据其量化关系，将测得的抗拉强度值进行相应修正。对复合材料等复杂材料，采用多元回归模型建立误差补偿公式，引入温度偏差、湿度偏差和交互项作为变量。同时建立补偿验证机制，定期采用标准样品进行实验，对比补偿前后数据与标准值的偏差，当偏差超过1%时，更新误差数据库和补偿模型。

结束语

材料力学实验室环境温湿度控制对实验结果影响重大，温湿度通过不同机制作用于各类材料，影响其力学性能与实验数据准确性。当前实验室温湿度控制存在标准执行差异、管控不均等问题。本文提出的差异化控制标准、全流程控制策略及实验误差补偿方案，能有效提升温湿度控制精度，减少实验误差。未来需持续完善相关策略，推动材料力学实验向更精准、可靠方向发展。

参考文献

- [1]高荣贵,秦婷.基于LabVIEW平台的标准实验室环境实时监测系统研究[J].内蒙古石油化工,2021,47(03):61-62+112.
- [2]王向玲.Proteus模拟温室温湿度控制系统的实践教学[J].实验室研究与探索,2020,39(01):120-124.
- [3]梁水宁,李垚,李景欣,何丽莲.制丝生产区域环境温湿度稳定性控制策略[J].设备管理与维修,2024,(08):107-109.
- [4]尚志红,梁卫航,王群伟.温湿度环境试验设备节能控制技术研究[J].电子产品可靠性与环境试验,2020,38(z1):94-95.