

**TONGJI UNIVERSITY**

博士研究生学位论文选题报告及工作计划

**课题名称 屈曲约束剪切钢板超低周疲劳性能研究**

**学 号 1510224**

**研 究 生 肖贲**

**专 业 结构工程**

**所在院系 土木工程学院建工系**

**导 师 孙飞飞 教授**

**选题时间 2017年11月**

**同济大学研究生院**

**年 月 日**

1．研究问题

|  |
| --- |
| 1.1在预研究的基础上提出具有创新性的科学问题  我国作为世界上地震活动最为频繁的国家之一，建筑结构的抗震设计成为现阶段结构设计的重中之重。传统的抗震设计通过增强结构自身的抗震性能来抵御地震作用，这种抗震方式缺乏自我调节能力，很多情况下很难达到理想的抗震效果，从而不满足安全性的要求。结构消能减震技术通过在结构中设置消能装置，吸收地震输入结构中的能量，以减少主体结构的地震响应，从而达到减震控制的目的。根据不同的材料、不同的消能机制和不同的构造形式，有多种不同的消能减震装置。其中利用金属的塑性变形是消耗地震能量最为有效的机制之一，应用较为广泛的有防屈曲支撑、剪切钢板阻尼器和钢板剪力墙等。  本课题拟针对屈曲约束剪切钢板，通过理论及实验研究其超低周疲劳性能，建立低屈服点钢材屈曲约束剪切钢板关于形状、削弱等的优化设计理论，并提出其刚度、强度、耗能能力的解耦设计方法，基于声发射检测技术和微观机制模型提出相应的超低周疲劳损伤评估和断裂预测方法。  1.2课题来源、选题依据和背景情况  我国东临环太平洋地震带，南接欧亚地震带，地质构造复杂，地震活动较为频繁，是世界上地震最多的国家之一，同时也是世界上地震损失最为惨重的国家之一。20世纪死亡人数在20万以上的大震共有两次，全都发生在我国：1920年宁夏海源8.5级地震死亡人数达23万，1976年唐山7.8级地震死亡人数达24万。2008年的汶川地震、2010年的玉树地震、2013年的雅安地震再次给人们敲响警钟，提高建筑物对地震的抵抗能力和消能减震技术的工程应用已成为科研工作人员不断研究和探索的重要课题。  图1.1 地震造成建筑物倒塌  金属消能器作为一种较为有效的消能减震机制，在国内外研究和应用都较为广泛，尤其是使用屈服点更低、延性更好的软钢作为耗能材料时能实现更佳的消能减震效果。剪切钢板因其构造措施简单、制作成本经济、安装维护方便、易于更换等优点，正得到越来越广泛的应用。然而剪切钢板的面外屈曲问题使得钢材强度难以充分利用，同时还会影响其滞回性能。屈曲约束剪切钢板能有效解决这一问题，因此针对屈曲约束钢板的相关性能研究具有现实意义。  1.3课题的研究目标以及理论意义和实际应用价值  1.3.1课题研究目标  1）建立低屈服点钢材屈曲约束剪切钢板关于形状、削弱等的优化设计理论；  2）通过超低周疲劳试验和理论分析研究屈曲约束剪切板的超低周疲劳破坏模式，并且试验过程中利用声发射检测技术对试验全程进行监测；  3）建立基于声发射特征参数的LYP225钢材损伤评估方法；  4）结合微观机制损伤模型，研究基于声发射的断裂因子以及断裂破坏预测方法；  5）利用声发射损伤模型对屈曲约束剪切钢板的超低周疲劳破坏进行断裂预测和试验验证；  6）提出一种屈曲约束剪切板的刚度-强度-累积延性解耦设计理论，并提出相应的参数化设计方法。  1.3.2 理论意义和实际应用价值  屈曲约束剪切钢板能有效解决剪切钢板阻尼器在剪切变形耗能时的屈曲问题，从而充分利用钢材强度，提高耗能性能，节约建造成本。利用声发射检测技术可实现对剪切钢板的实时损伤监测，解决了带面外约束装置的耗能构件无法打开探伤的问题。同时基于声发射特征参数的断裂因子和断裂破坏预测也能对微观机制模型建立基于试验现象的补充验证。屈曲约束剪切钢板的优化设计理论和刚度-强度-累积延性的解耦设计方法为其投入实际工程应用提供了更加良好的基础。 |

2．文献综述（不得少于3000字）

|  |
| --- |
| 2.1国内外在该研究方向的研究现状及发展动态 2.1.1 软钢阻尼器应用现状  被动耗能系统是结构抗震设计中应用最为广泛的技术，其在减轻结构地震危害以及修复老化或有缺陷结构等方面具有巨大优势[1]。在各种被动耗能机制中，金属屈服耗能是现阶段实际工程应用中较为普遍的一种。其中由于软钢阻尼器耗能原理明确，构造简单，滞回性能稳定，震后更换方便[2]，因此近年来抗震加固工程中得到了广泛的应用。迄今为止，国外已有大量采用软钢阻尼器的建筑落成，以结构控制技术应用发展较快的国家如美国、日本、加拿大、新西兰、墨西哥为主[3, 4]，国内对软钢阻尼器研究起步较晚，但也已取得了一定的成果。  美国盐湖城的华莱士班尼特联合大楼[5]建于20世纪60年代，研究表明盐湖城区域可能发生的大震要高于原来的设防标准，故急需对该大楼进行抗震加固。经过十余种方案比较后，决定采用防屈曲耗能支撑进行加固，最终共使用了344根防屈曲支撑。采用减震加固方案，一方面经济上节约成本，另一方面施工简便，缩短工期，本项目获得了犹他州2002年的优秀工程奖。    图2.1 华莱士班尼特联合大楼防屈曲耗能支撑的安装  日本神户的市政厅[6]建于1988年，为35层钢筋混凝土核心筒结构，其中第一层和第二层采用了钢板剪力墙作为抗震耗能措施。该建筑是目前经受地震检验的最成功的钢板剪力墙结构，经受了1995年阪神大地震的考验。地震中，市政厅与相邻的一栋八层钢筋混凝土结构的建筑形成鲜明对比：相邻建筑第四层被压扁，上部结构整体坍塌，如图2.2所示；而市政厅仅在第26层出现局部屈曲，整体结构未出现明显的破坏[7]，如图2.3所示。    图2.2 相邻建筑震后情况 图2.3 神户市政厅震后情况  国内应用软钢阻尼器的实际工程案例比较具有代表性的有上海移动万荣机房大楼[8]，为现浇钢筋混凝土框架结构。该大楼原设计为通用厂房，后欲改作通讯大厦，抗震设防由丙类提高为乙类，故需进行抗震加固改造。研究决定在结构适当位置安装开孔式软钢阻尼器(HADAS)，以提高结构阻尼，降低结构的地震反应。最终共使用32组HADAS阻尼器。加固后，有效地改善了结构的扭转，最大层间位移角均满足规范要求。  2.1.2 屈曲约束钢板墙研究现状  钢板剪力墙和剪切钢板具有相同的剪切屈服耗能机制，因此对于屈曲约束钢板墙的研究对屈曲约束剪切钢板的研究有一定的指导作用。  钢板剪力墙由于其能同时兼顾耗能和抗侧两项功能而广泛应用于新结构抗震设计和既有结构抗震加固中[9]，其高强度和高刚度能够有效提高结构承载能力并减小层间位移，其良好的延性和耗能能力也使得结构能够抵抗强地震作用[10]。然而，钢板剪力墙的使用仍然存在一系列问题，当钢板剪力墙作为抗侧构件用于结构抗震设计中时，在钢板墙插入位置周围的框架构件中可能会产生巨大应力[11, 12]，从而需要加大这些框架构件的截面尺寸以满足承载力需求，这就大幅增加了建造成本。为了解决这一问题，现有研究中有多种解决方案，如芯板仅与梁连接，通过开孔或开缝等方式削弱芯板，使用其他材料如低屈服点钢或铝等[13]。  另外，普通钢板墙在水平剪力作用下易屈曲，在钢板屈曲前，它通过整体弯剪变形来抵抗水平力，屈曲后形成斜向拉力场，以拉力带来平衡水平力。由于拉力带只能承受拉力，另一斜向无法形成压力场，由于其屈曲承载力远低于其屈服承载力，因此压力场很容易发生面外屈曲，从而导致其耗能能力得不到充分发挥，滞回曲线捏拢明显，如图2.4所示[14-17]。    图2.4 普通钢板剪力墙滞回曲线  因此，为充分发挥钢板墙的耗能能力，Hitaka[18, 19]等和Astaneh-Asl[17]等较早提出了屈曲约束钢板墙，即不会发生面外屈曲的钢板剪力墙。它由承受水平剪力的芯板和约束芯板面外屈曲的约束板组成，如图2.5所示，其理想的滞回曲线则如图2.6所示。  组合墙示意图  图2.5 屈曲约束钢板墙的基本组成 图2.6 屈曲约束钢板墙的滞回曲线  根据芯板是否进行内部削弱以及削弱的方式不同，屈曲约束钢板墙的芯板又可分为开圆孔[20, 21]、开竖缝[18, 19]、I型[22, 23]、开斜槽[24-27]以及普通矩形芯板[28-30]。其中，开圆孔墙(如图2.7所示)主要以圆孔所在拉力带和压力带的受拉与受压轴向刚度来抵抗水平剪力和提供抗侧刚度；开竖缝墙(如图2.8所示)则主要由缝间弯剪杆以及上中下板带的弯剪变形来提供；I型芯板则是将芯板中部削弱成狗骨式弯剪杆，通过单个弯剪杆的变形来提供抗侧刚度和进行屈服耗能，如图2.9所示；最后，通过在芯板上开斜槽，形成斜向的轴向受力条带，利用该条带的轴向刚度和承载力，来提供刚度和进行屈服耗能，如图2.10所示。    图2.7 开圆洞芯板 图2.8 开竖缝芯板  Macintosh HD:Users:benny_7096:Desktop:8.tiff Macintosh HD:Users:benny_7096:Desktop:1.tiff  图2.9 I型芯板 图2.10 开斜槽芯板  2013年Matthew R. Eatherton[31, 32]等提出一种环状开孔钢板墙以解决钢板墙屈曲问题，提高其滞回耗能性能。其机理是圆环受拉变形为椭圆，拉向伸长，压向缩短，且缩短/拉长大于1，因此消除了垂直于受拉区的松弛，防止屈曲，如图所示。通过调整多个不同的几何参数如钢板厚度，圆环外半径，圆环宽，和连杆宽，实现能够通过不同的参数组合分别调整钢板墙强度、刚度、和耗能性能，从而满足不同的设计需求。    图2.11 环状开孔钢板剪力墙    图2.12 环形结构抵抗屈曲机制  2.1.3 屈曲约束剪切钢板研究现状  剪切钢板阻尼器是利用钢板平面内产生剪切弹塑性变形以达到消能减震的目的[33]，因其取材容易、初始刚度大、滞回性能稳定、疲劳性能好等优点，国内外学者展开了大量的研究，并在一些实际工程中得到应用。  剪切钢板阻尼器的基本构造由腹板、左右侧翼缘、上下端连接板组成，构造如图2.13所示。腹板为主要的耗能部件，左右侧翼缘对腹板起约束作用，抑制腹板发生转动，上下端连接板使阻尼器与支撑连接为整体[6]。    图2.13 剪切钢板阻尼器构造  剪切钢板阻尼器的性能指标主要包括刚度[34-37]、强度[38-41]、延性和耗能能力[42]。目前，由于影响剪切钢板阻尼器延性及耗能能力的因素众多，包括腹板的形状、尺寸[43]、材料[44, 45]以及不同削弱方式[46, 47]等，且缺少明确的理论计算方法，因此多以试验研究为主。  **2.1.3.1 腹板宽厚比**  1997年日本藤田技术研究所建筑研究部田中清、佐佐木康人[48]围绕剪切钢板阻尼器腹板宽厚比对阻尼器破坏形态与耗能能力的影响进行实验研究。实验结果表明剪切钢板阻尼器在往复水平剪切力作用下，随着剪切变形的增大，腹板会沿对角线出现平面外失稳现象，最大平面外位移出现在腹板中心处，腹板宽厚比越大，沿腹板对角线处失稳变形越显著，腹板在中部产生开裂；当宽厚比不大时，沿腹板对角线平面外失稳变形得到减缓，开裂出现在腹板的端部，出现位置为腹板与翼缘交界处。    图2.14 剪切钢板阻尼器平面外失稳  通过比较两种不同宽厚比剪切钢板阻尼器滞回曲线可发现，在腹板宽厚比较小的情形下，随着拉力场的发展，腹板屈服区域较大，滞回曲线形状近似饱满的平行四边形；腹板宽厚比较大的情形下，由于腹板平面外发生失稳，限制了拉力场的发展，故滞回曲线饱满程度不如腹板宽厚比较小的情形，当面外失稳出现后，拉力场从平衡位置附近经历由稳定到削弱到增强再到稳定的过程，故滞回曲线在平衡位置附近呈现明显的捏合现象  **2.1.3.2 腹板钢材屈服点强度**  1999年日本藤田技术研究所建筑研究部田中清、佐佐木康人、米山真一朗[49]对两种宽厚比腹板不同屈服强度钢材的剪切钢板阻尼器的性能进行实验研究，得到不同屈服强度钢对阻尼器破坏形态及耗能能力的影响。实验表明，钢材屈服强度越大，腹板的剪切屈曲应力越大，能有效地限制和延迟腹板发生面外失稳现象。  **2.1.3.3 腹板加劲情况**  通过增大腹板宽厚比能有效限制剪切钢板阻尼器腹板出现面外失稳现象，但由于加大了腹板厚度，剪切钢板阻尼器屈服力提高，导致建筑主体结构先于阻尼器进人屈服状态，使阻尼器没有达到理想的耗能效果。1999年Kiyoshi TANAKA、Yasuhito SASAKI[50]围绕加劲肋设置数目对剪切钢板阻尼器性能的影响进行了试验研究。在腹板中设置加劲肋是另一有效限制腹板面外失稳的措施，通过合理设置加劲肋，一方面能提高腹板的屈曲应力，延迟腹板发生面外失稳，另一方面能使腹板拉应力场与压应力场重新分布，使得腹板进入屈服区域面积扩大，实现腹板截面上多点屈服，有效地提高耗能能力。结果表明，加劲肋设置的数目增多，耗能区域增大，滞回环所围面积增大，同时改善了滞回环发生的捏合现象，且刚度和强度均没有产生退化，延性亦得到有效的提高。  然而通过设置腹板加劲肋的方式限制剪切钢板的面外失稳仍然存在很多问题[51]。焊接加工不可避免的会产生残留应力，残留变形，影响钢板的力学性能。由于钢板较薄，施焊起来容易“烧穿”，大量焊接部位不可避免地存在裂纹、夹杂等缺陷，在往复荷载作用下，裂纹易迅速扩展并很快发生脆性断裂，降低了钢板的延性。其次，焊接产生的残余应力和面外变形影响到钢板的力学性能，特别是对抗侧刚度的削弱较大。而且加劲肋易发生局部屈曲并降低加劲肋的加劲效率，反复的局部屈曲加速了加劲肋的断裂，最终失去加劲作用。因为这些原因使得设置腹板加劲肋的剪切钢板阻尼器性能的稳定性得不到保障。  **2.1.3.4 腹板削弱**  剪切钢板阻尼器腹板钢材常采用低屈服点钢，在实际应用中，阻尼器腹板的剪切应变一般在12%左右，而低屈服点钢的伸长率要远高于此，这说明低屈服点钢的材料特性并没有充分展现，阻尼器延性还有极大空间可提升，为了充分利用钢材，极大地提高剪切钢板阻尼器的变形能力，从而提高阻尼器的耗能效果，需要克服剪切钢板阻尼器腹板板角应力集中现象，避免腹板板角过早出现破坏。通过腹板削弱可有效改善这一问题，常见的削弱方式有腹板中部变薄[52]、条形压槽或开缝[53]、开多孔[13, 54]等。这些削弱方式能对腹板中部刚度进行削弱，相对提高了板角处的刚度，另外在削弱处存在应力集中，可使得腹板实现多点屈服，充分利用材料，使得剪切钢板的延性大幅提升。然而削弱后的剪切钢板滞回曲线并没有削弱前饱满，耗能能力有所降低，因此如何在保证优良的滞回耗能能力的同时提升剪切钢板的延性仍然值得研究。  **2.1.3.5 防屈曲剪切钢板阻尼器**  2016年东南大学黄镇[55]等人针对目前常规剪切钢板阻尼器防屈曲构造措施的不足，提出了3种改进型防屈曲构造方案，即夹板防屈曲、肋板防屈曲、边框防屈曲。并对改进型防屈曲剪切钢板阻尼器的基本性能参数做了理论推导、有限元分析以及试验验证，结果表明改进型防屈曲剪切钢板阻尼器具有稳定的耗能能力和抗低周疲劳性能。  2.1.4 声发射技术研究现状  **2.1.4.1 声发射技术原理**  声发射是材料或构件内部某区域内的单元超过其对应的屈服极限从而进入塑性或有裂纹开始形成、扩展及断裂等微观结构变化时短时间内快速释放出大量变形能量而产生一系列瞬态应力波的现象[56-58]。声发射状态表征着材料内部微观变形及裂纹开展的情况。通过对声发射信号进行采集和处理进一步进行分析和研究，可推断材料内部的状态，甚至反演其破坏过程及机理[59, 60]。    图2.15 声发射检测原理  另一方面，声发射信号是结构经历塑性变形、微观裂纹产生和扩展以及最终裂纹贯穿导致宏观开裂等阶段的必然伴生现象[61]。整个过程的声发射信号基本上包含了结构疲劳演化过程中不可逆累积损伤的全部信息。那么声发射信号与结构的损伤演化过程必然也是密切相关的。声发射检测通过连续监视和分析结构内缺陷的发展变化，可以及时地评价结构的损伤状态，确定结构的剩余寿命。  此外，当同时采用多个声发射传感器采集声发射信号时，通过利用应力波到达不同传感器的时间差可以定位信号源位置，可确定构件材料中集中损伤破坏的位置。  目前，声发射检测技术在金属材料领域的研究包括以下几个方面：  1）通过声发射信号波形特征判断材料损伤类型[62-64]；  2）通过声发射信号量化特征参数从统计学角度判断材料损伤程度[65, 66]；  3）通过声发射信号量化特征参数的累积变化规律结合损伤变量建立相应的损伤模型[67, 68]。  **2.1.4.2 基于声发射参数的疲劳断裂**  1995年Berkovits[69] 研究了声发射特征参数与光滑试样疲劳加载中裂纹生成和拓展的关系，试验表明声发射振铃计数率与裂纹拓展率之间存在非线性关系。2003年Roberts[70]等研究了焊接钢材中的疲劳断裂拓展与声发射特征参数的关系，结果表面声发射振铃计数率与裂纹拓展率间具有明确关系，可用于构件疲劳寿命的预测。2011年Aggelis[71]等研究了V型缺口钢板拉压疲劳下的声发射信号特征，发现了声发射能量和持续时间等参数随损伤累计而不断增加的规律。2013年大连理工大学王慧晶[72]结合传统断裂力学以及分形理论研究了基于声发射参数的材料疲劳断裂，采用以声发射参数定义的损伤变量和以循环次数以及分形维数定义的新损伤变量，通过损伤演化方程推导了声发射参数与裂纹扩展率之间的关系。不过其研究还缺乏声发射实验验证，并且声发射现象、性质和机制在理论上还存在许多尚未探明的问题。  **2.1.4.3 基于声发射参数的损伤模型**  2012年南昌大学樊保圣[73]以连续介质损伤力学(Continuum Damage Mechamcs-CDM)为基础，建立了基于声发射特征参数的损伤参数对Q235钢材、铸铁板材试件拉伸过程和Q235钢梁试件的三点弯曲进行定量损伤分析。最终选取累积振铃计数和累积能量作为建立损伤模型的基本参数  现有研究中基于声发射的疲劳问题研究多结合传统断裂力学，结合连续介质损伤力学的研究也较少，而考虑材料损伤的微观机制，基于微观机制模型的声发射损伤模型的研究几乎为空白，并且这方面的研究有助于对声发射微观机理的进一步理解，因此有必要开展结合微观机制模型建立声发射损伤评估方法的研究。  2.1.5 微观机制模型研究现状  **2.1.5.1 VGM模型和SMCS模型**  结构构件在地震荷载作用下，通常在循环几十次甚至十次以内就引起破坏，这种破坏模式称为超低周疲劳破坏，金属构件在这种疲劳荷载作用下多发生延性断裂。对于延性断裂破坏的细观损伤机制，在McClintock[74]和Rice[75]具有开创性研究的基础上各国学者提出了许多描述微孔增长和损伤演化的模型，在钢结构中应用较普遍的是微孔扩展模型（Void growth model，VGM）[75, 76]和应力修正临界应变模型（Stress modified critical strain，SMCS）[76, 77]。该模型用微孔洞平均半径增长来描述微孔洞的增长，微孔洞的增长与塑性应变和应力三轴度的变化历史有关。当微孔洞平均半径达到其临界半径时，断裂就发生了。该模型的准确性已经由多名学者的实验研究得到验证[78-81]。  国内在这方面的研究起步于90 年代，郑长卿等[82]研究了延性断裂过程中微孔洞的形核、扩展聚合过程及其相应规律，建议用临界扩张比作为韧性断裂特征参数。同济大学廖芳芳和王伟等[83-85]校准了在中国大量使用的Q345 钢、焊缝金属的VGM 模型和SMCS 模型参数。王元清等[86]同样采用VGM、SMCS 模型对于梁柱焊接节点的断裂破坏进行了分析研究。  Rice和Tracey推导了理想弹塑性材料中的单个圆柱形和球形空穴在三轴应力作用下的扩张方程，指出空穴扩张速率与应力状态的三轴性成指数关系。对于球形的空穴，空穴扩张速率可表达为：    其中R是瞬时空穴直径，是平均应力，是屈服强度，是等效塑性应变，d是等效塑性应变增量。  对上式进行积分，可以得到在一个塑性加载过程中总的空穴扩张量为：    为了在等式中考虑强化特性，D’Escata和Devaux将屈服强度替换为有效应力或von Mises应力，等式变为：    平均应力与有效应力的比值定义为应力三轴度，其表达式为，可度量应力状态的约束情况。  当空穴在施加的塑性应变作用下扩张直至达到临界空穴尺寸或临界空穴扩张比时，会发生延性裂纹开展。为了用这个模型预测断裂，需要进行有限元分析来记录应力三轴度和塑性应变并计算等式左边的积分直到它达到临界值。系数0.283是Rice和Tracey曲线拟合得到的，将这个系数计为常数c，则上式简化为：    其中从空穴扩张角度定义了材料承载力，是一个材料特性常数，可以用圆周平滑槽口试件的拉伸试验对其进行校准，并将其用于有限元分析以预测断裂破坏，上式即为VGM模型。  VGM模型中包含了应力三轴度对塑性应变的显式积分，然而在许多实际情况中，材料变形不是很大，即使塑性应变增加很快，但应力三轴度大体上保持不变，如图1.6所示。则SMCS模型可表述为：      图1.6 应力三轴度与塑性应变关系曲线  **2.1.5.2 CVGM模型和DSPS模型**  Kanvinde 和 Deierlein[87]通过引入一个考虑拉压不同的符号函数，将钢材微孔扩展模型推广到循环荷载情况下，即循环微孔扩展模型（CVGM, Cyclic Void Growth Model）和退化有效塑性应变模型（Degraded Significant Plastic Strain model，简称DSPS）[88]。DSPS模型用有效塑性应变替代了SMSC模型中的等效塑性应变，以应对循环荷载作用下空穴的扩展和收缩两种状态。另外还引入了表征循环损伤累积过程的损伤函数，DSPS模型的完整形式为：    在使用DSPS模型之前必须有从单调试验中获得的SMCS参数，一旦SMCS参数确定下来，则仅有的另一个损伤参数可以由开圆周平槽口圆形试件在循环荷载下的试验确定。  DSPS模型假定应力三轴度不随塑性应变的增加发生显著变化，而延性较好的材料在破坏前发生较大的变形，应力三轴度变化很大，为了克服这一假定的局限性，可以对DSPS模型进行修改，考虑所有的应力三轴度变化，并尽可能准确地追踪空穴扩张和聚合过程，使用CVGM模型。其表达式为：    式中是与DSPS模型中的类似的损伤参数，可以由开圆周平滑槽口圆形试件在循环荷载下的试验确定。  CVGM模型和DSPS模型预测断裂的准确性已被一些学者通过实验加以验证[89-94]。  **2.1.5.3 Gurson模型和GTN模型**  Gruson 模型[95]从韧性断裂的微观机制出发，物理背景清晰，是一套比较完整的用于描述微孔洞影响材料塑性的本构方程。Gurson 模型表达了韧性材料中以微孔洞形式表征的杂质或第二相粒子所占的体积比，但是没有考虑细观微孔洞大小和微孔洞的尺度概念。随后Tevergaard 和Needleman[96, 97]用变量f\*来代替微孔洞体积比，在临近断裂时f\*的增大速率明显大于微孔洞体积比f 所描述的微孔洞聚合对损伤的影响，并建立了GTN（Gurson-Tevergaard-Needleman）模型。目前GTN模型在材料延性断裂以及延性裂纹扩展中得到了广泛应用[98-101]。  Leblond，Perrin 和Devaux[102]在GTN 模型基础上提出LPD 模型，通过将GTN 屈服面方程中的Cauchy 应力张量转变为Cauchy 应力张量的变分值和背应力张量来考虑了循环荷载作用下屈服面的随动强化或弱化。Besson[103]、Mühlich [104]等给出了随动硬化下LPD 模型的应力更新数值算法，算法的重点在于应用牛顿－拉普森迭代法求解非线性方程组。  2.2研究问题在本学科的地位、前沿性特征与价值  剪切钢板阻尼器作为一种实用的金属消能装置，在建筑结构抗震设计和抗震加固等领域有广阔的应用前景。然而目前针对剪切钢板阻尼器的研究表明其仍具有一系列问题阻碍了其大规模投入到实际工程应用中，如面外屈曲、钢材延性利用率低、性能稳定性差等。本研究旨在研究新型的屈曲约束剪切钢板，通过布置面外约束装置解决剪切钢板面外失稳问题，使得钢板可以做到不同尺寸、厚薄和形状，以满足不同的刚度、强度、延性和耗能能力需求。在此基础上通过新型的开洞削弱形式使得刚度-强度-累积延性解耦，并实现参数化设计方法从而能够更方便高效地投入实际工程应用中。应用声发射检测技术对剪切钢板的超低周疲劳进行损伤监测，并结合微观机制模型建立基于声发射特征参数的损伤模型，提出相应的断裂因子用于剪切钢板超低周疲劳的断裂预测。  2.3研究领域里尚未解决的问题及其原因或瓶颈  总结上述已有研究，目前研究领域内存在的问题主要表现在以下几个方面：  1）针对剪切钢板阻尼器的已有研究多是关于普通剪切钢板的研究，关于屈曲约束剪切钢板阻尼器的相关研究还较少，对于其在超低周疲劳下的性能了解尚少。原有的设计方法和相关理论在屈曲约束剪切钢板阻尼器中是否仍然适用还有待研究；  2）由于研究中的剪切钢板阻尼器还存在一系列问题，如面外屈曲、钢材延性利用率低、性能稳定性差等，另外缺乏完整的设计标准以应对不同工程项目的性能需求，使得其难以大规模投入到实际工程应用中；  3）剪切钢板阻尼器的各项性能指标关联性较强，无法同时满足不同的刚度、强度需求。如何实现刚度-强度-累积延性的解耦是已有研究中的一大瓶颈；  4）缺少剪切钢板阻尼器震后损伤评估方法，尤其对于布置有面外约束装置的剪切钢板，因为无法时刻打开面外约束装置进行探伤，因此需要一种间接的损伤评估方法。  2.4研究问题的创新性  1）目前基于声发射对钢结构的损伤研究多在材料层面，在构件层面尤其是剪切钢板的研究较少。本课题拟基于声发射技术研究屈曲约束剪切钢板超低周疲劳复杂受力状态下的损伤机理；  2）目前声发射技术在钢结构疲劳断裂领域的研究多结合传统断裂力学，而结合微观机制的研究几乎空白。本课题拟利用声发射技术探究针对微观机制的声发射机理，实现对屈曲约束剪切钢板的损伤评估，并提出相应的断裂因子实现对剪切钢板在超低周疲劳下的断裂预测和定位；  3）已有研究中只能实现对剪切钢板刚度和强度的解耦，却无法做到强度-刚度-累积延性的解耦。本课题拟提出屈曲约束剪切钢板的刚度-强度-累积延性的解耦设计理论，实现可参数化设计的剪切钢板设计方法，以满足不同的工程需求。 |

# 附：参考文献

|  |  |
| --- | --- |
| 序号 | 文献目录（作者、题目、刊物名、出版时间、页次） |
| 1 | Teixeira, P., Martínez, G. and Graciano, C. Shear response of expanded metal panels. Engineering Structures, 2016, 106(Supplement C), 261-272. |
| 2 | 林坚湘. 高性能剪切钢板阻尼器的性能模拟分析与试验研究. (华中科技大学, 2011). |
| 3 | 何志明, 周云 and 陈清祥. 剪切钢板阻尼器研究与应用进展. 地震工程与工程振动, 2012, 32(6), 124-135. |
| 4 | 章丛俊, 李爱群 and 赵明. 软钢阻尼器耗能减震结构的研究与应用综述. 工业建筑, 2006, 36(9), 17-21. |
| 5 | 褚洪民, 钱洪涛, 邓雪松 and 周云. 应用防屈曲耗能支撑进行抗震加固的研究与应用. 第十六届全国现代结构工程技术交流会, pp. 397-408河北保定, 2008). |
| 6 | 刘峰. 新型防屈曲剪切钢板阻尼器性能研究. (东南大学, 2014). |
| 7 | 孟庆骞. 新型防屈曲低屈服点钢板剪力墙理论分析与试验研究. (东南大学, 2012). |
| 8 | 王威, 吕西林 and 徐崇恩. 低屈服点钢在结构振动与控制中的应用研究. 结构工程师, 2007, 23(6), 83-88. |
| 9 | Formisano, A., Lombardi, L. and Mazzolani, F.M. On the use of perforated metal shear panels for seismic-resistant application. 2015). |
| 10 | De Matteis, G., Formisano, A. and Mazzolani, F.M. An innovative methodology for seismic retrofitting of existing RC buildings by metal shear panels. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2009, 38(1), 61-78. |
| 11 | Sabouri-Ghomi, S., Ventura, C.E. and Kharrazi, M.H. Shear analysis and design of ductile steel plate walls. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(6), 878-889. |
| 12 | Sabouri-Ghomi, S. Discussion of “Plastic Analysis and Design of Steel Plate Shear Walls” by Jeffrey Berman and Michel Bruneau. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(11), 695-697. |
| 13 | Formisano, A., Lombardi, L. and Mazzolani, F.M. Perforated metal shear panels as bracing devices of seismic-resistant structures. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 126, 37-49. |
| 14 | 郭彦林, 周明, 董全利 and 王小安. 三类钢板剪力墙结构试验研究. 建筑结构学报, 2011, 32(1), 17-29. |
| 15 | 郭彦林 and 董全利. 钢板剪力墙的发展与研究现状. 钢结构, 2005, 20(1), 1-6. |
| 16 | Berman, J.W. and Bruneau, M. Experimental Investigation of Light-Gauge Steel Plate Shear Walls. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(2), 259-267. |
| 17 | Zhao, Q. and Astaneh-Asl, A. Cyclic Behavior of Traditional and Innovative Composite Shear Walls. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2), 271-284. |
| 18 | Hitaka, T. and Matsui, C. Experimental Study on Steel Shear Wall with Slits. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(5), 586-595. |
| 19 | Hitaka, T., Matsui, C., Tsuda, K., Sadakane, Y., Imamura, T. and Hatato, T. Elastic plastic behavior of building steel frame with steel bearing wall with slits. Journal of Structural & Construction Engineering Transactions of Aij, 2000, 153-160. |
| 20 | Bhowmick, A.K. Seismic behavior of steel plate shear walls with centrally placed circular perforations. Thin-Walled Structures, 2014, 75, 30-42. |
| 21 | Valizadeh, H., Sheidaii, M. and Showkati, H. Experimental investigation on cyclic behavior of perforated steel plate shear walls. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 70, 308-316. |
| 22 | 刘学亮 and 李国强. 小高宽比Ⅰ型屈曲约束钢板剪力墙抗震性能研究. 2012). |
| 23 | 陆烨. 大高宽比屈曲约束组合墙钢框架束柱体系性能研究., pp. 1-158 (同济大学, 2009). |
| 24 | 刘佳, 金双双 and 欧进萍. 防屈曲开斜槽耗能钢板剪力墙的滞回性能分析. 防灾减灾工程学报, 2014, v.34(3), 296-301. |
| 25 | 刘佳. 防屈曲开斜槽耗能钢板剪力墙的性能研究. (哈尔滨工业大学, 2013). |
| 26 | Jin, S., Ou, J. and Liew, J.Y.R. Stability of buckling-restrained steel plate shear walls with inclined-slots: Theoretical analysis and design recommendations. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 117, 13-23. |
| 27 | Lin, C.H., Tsai, K.C., Lin, Y.C., Wang, K.J., Hsieh, W.D., Weng, Y.T., Qu, B. and Bruneau, M. THE SUB-STRUCTURAL PSEUDO DYNAMIC TESTS OF AFULL-SCALE TWO-STORY STEEL PLATE SHEAR WALL., 2006. |
| 28 | 宁子健, 郝际平, 于金光, 钟炜辉 and 白睿. 无粘结十字加劲钢板剪力墙结构抗剪性能分析. 钢结构, 2013, 28(7), 11-15. |
| 29 | 周明. 非加劲与防屈曲钢板剪力墙结构设计方法研究. (清华大学, 2009). |
| 30 | 于金光. 半刚性框架—非加劲及屈曲约束钢板剪力墙结构抗震性能试验与理论研究. (西安建筑科技大学, 2013). |
| 31 | Egorova, N., Eatherton, M.R. and Maurya, A. Experimental study of ring-shaped steel plate shear walls. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 103, 179-189. |
| 32 | Maurya, A., Egorova, N. and Eatherton, M.R. Development of Ring-Shaped Steel Plate Shear Walls., pp. 2971-29822013). |
| 33 | Mistakidis, E.S., De Matteis, G. and Formisano, A. Low yield metal shear panels as an alternative for the seismic upgrading of concrete structures. Advances in Engineering Software, 2007, 38(8), 626-636. |
| 34 | 刘凌飞 and 周德源. 剪切钢板阻尼器刚度和耗能的参数研究. 结构工程师, 2016, 32(3), 30-36. |
| 35 | Bhowmick, A.K. Seismic behavior of steel plate shear walls with centrally placed circular perforations. Steel Construction, 2014, 75(2), 30-42. |
| 36 | Valizadeh, H., Sheidaii, M. and Showkati, H. Experimental investigation on cyclic behavior of perforated steel plate shear walls. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 70(2), 308-316. |
| 37 | Roberts, T.M. and Ghomi, S.S. Hysteretic characteristics of unstiffened plate shear panels. Thin-Walled Structures, 1991, 12(2), 145-162. |
| 38 | Basler, K. Strength of plate girders in shear. Journal of the Structural Division, 1961, 87(7), 151-180. |
| 39 | Bhowmick, A.K., Grondin, G.Y. and Driver, R.G. Nonlinear seismic analysis of perforated steel plate shear walls. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 94(3), 103-113. |
| 40 | Sabouri-Ghomi, S., Ventura, C.E. and Kharrazi, M.H.K. Shear Analysis and Design of Ductile Steel Plate Walls. Journal of Structural Engineering, 2004, 131(6), 878-889. |
| 41 | Roberts, T.M. and Sabouri-Ghomi, S. Hysteretic characteristics of unstiffened perforated steel plate shear panels. Thin-Walled Structures, 1992, 14(2), 139-151. |
| 42 | De Matteis, G., Formisano, A., Mazzolani, F.M. and Panico, S. Design of low-yield metal shear panels for energy dissipation. (na, 2005). |
| 43 | Formisano, A., Mazzolani, F.M. and De Matteis, G. Numerical analysis of slender steel shear panels for assessing design formulas. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2007, 7(02), 273-294. |
| 44 | Formisano, A., Mazzolani, F.M., Brando, G. and De Matteis, G. Numerical evaluation of the hysteretic performance of pure aluminium shear panels. Stress-The International Journal on the Biology of Stress, 2006, 200(300), 400. |
| 45 | De Matteis, G., Formisano, A., Panico, S. and Mazzolani, F.M. Numerical and experimental analysis of pure aluminium shear panels with welded stiffeners. Computers & Structures, 2008, 86(6), 545-555. |
| 46 | Purba, R.H. Design recommendations for perforated steel plate shear walls. (M. Sc. Thesis, State Univ. of New York at Buffalo, Buffalo, NY, 2006). |
| 47 | Roberts, T.M. and Sabouri-Ghomi, S. Hysteretic characteristics of unstiffened perforated steel plate shear panels. Thin-Walled Structures, 1992, 14(2), 139-151. |
| 48 | Tanaka, K. and Sasaki, Y. STUDY ON ENERGY ABSORBING PERFORMANCE OF SEISMIC CONTROL PANEL-DAMPERS USING LOW-YIELD-POINT STEEL UNDER STATIC LOADING. Journal of Structural & Construction Engineering, 1998, 63(509), 159-166. |
| 49 | Tanaka, K., Sasaki, Y. and Yoneyama, S.I. AN EXPERIMENTAL STUDY ON HYSTERETIC PERFORMANCE OF SHEAR PANEL DAMPERS USING DIFFERENT STRENGTH TYPE OF STEEL UNDER STATIC LOADING. Journal of Structural & Construction Engineering, 1999(520), 117-124. |
| 50 | Tanaka, K. and Sasaki, Y. Hysteretic performance of shear panel dampers of ultra low yield-strength steel for seismic response control of buildings. 2000). |
| 51 | 小池洋平, 谷中聡久, 宇佐美勉, 葛漢彬, 尾下里治, 佐合大 and 鵜野禎史. An experimental study on developing high-performance stiffened shear panel dampers. 構造工学論文集, 2008, 54, 372-381. |
| 52 | Zhang, C., Zhang, Z. and Shi, J. Development of high deformation capacity low yield strength steel shear panel damper. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 75(7), 116-130. |
| 53 | Cortes, G. and Liu, J. Steel Slit Panel Configurations. Proceedings Ofwcee, 2008. |
| 54 | Chan, R.W.K., Albermani, F. and Kitipornchai, S. Experimental study of perforated yielding shear panel device for passive energy dissipation. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 91(12), 14-25. |
| 55 | 黄镇, 李芮秋, 刘峰 and 李爱群. 改进型防屈曲剪切钢板阻尼器受力性能研究. 建筑结构学报, 2016, 37(6), 85-92. |
| 56 | Chai, M., Zhang, J., Zhang, Z., Duan, Q. and Cheng, G. Acoustic emission studies for characterization of fatigue crack growth in 316LN stainless steel and welds. Applied Acoustics, 2017, 126, 101-113. |
| 57 | Inspection, T.J.S.F. Acoustic Emission Testing. |
| 58 | Inspection, T.J.S.F. Practical Acoustic Emission Testing. |
| 59 | Antonaci, P., Bocca, P. and Masera, D. Fatigue crack propagation monitoring by Acoustic Emission signal analysis. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 81, 26-32. |
| 60 | X., L.I. and Zhang, Y. Analytical study of piezoelectric paint sensor for acoustic emission-based fracture monitoring. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2008, 31(8), 684-694. |
| 61 | 李志军. 屈曲约束钢板剪力墙连接性能研究. (Tongji University, 2015). |
| 62 | Shaira, M., Godin, N., Guy, P., Vanel, L. and Courbon, J. Evaluation of the strain-induced martensitic transformation by acoustic emission monitoring in 304L austenitic stainless steel: Identification of the AE signature of the martensitic transformation and power-law statistics. Materials Science & Engineering A, 2008, 492(1–2), 392-399. |
| 63 | Godin, N., Huguet, S. and Gaertner, R. Integration of the Kohonen's self-organising map and k-means algorithm for the segmentation of the AE data collected during tensile tests on cross-ply composites. NDT & E International, 2005, 38(4), 299-309. |
| 64 | Godin, N., Huguet, S., Gaertner, R. and Salmon, L. Clustering of acoustic emission signals collected during tensile tests on unidirectional glass/polyester composite using supervised and unsupervised classifiers. NDT & E International, 2004, 37(4), 253-264. |
| 65 | Dai, S.T. and Labuz, J.F. Damage and Failure Analysis of Brittle Materials by Acoustic Emission. Journal of Materials in Civil Engineering, 1997, 9(4), 200-205. |
| 66 | 张明, 李仲奎, 杨强 and 冯夏庭. 准脆性材料声发射的损伤模型及统计分析. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12), 2493-2501. |
| 67 | 王蒙, 阳能军, 龙宪海 and 王新刚. 基于声发射技术的碳/环氧复合材料拉伸损伤模型. 兵器装备工程学报, 2011, 32(10), 144-146. |
| 68 | 李冬生 and 欧进萍. 钢绞线拉伸过程中的声发射特征及其损伤演化模型. 公路交通科技, 2007, 24(9), 57-60. |
| 69 | Berkovits, A. and Fang, D. Study of fatigue crack characteristics by acoustic emission. Engineering Fracture Mechanics, 1995, 51(3), 401-409. |
| 70 | Roberts, T.M. and Talebzadeh, M. Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(6), 695-712. |
| 71 | Aggelis, D.G., Kordatos, E.Z. and Matikas, T.E. Acoustic emission for fatigue damage characterization in metal plates. Mechanics Research Communications, 2011, 38(2), 106-110. |
| 72 | 王慧晶. 基于声发射参数的材料疲劳断裂研究. (大连理工大学, 2013). |
| 73 | 樊保圣. 金属材料损伤过程声发射特征参数及损伤模型研究. (南昌大学, 2012). |
| 74 | Mcclintock, F.A. A Criterion for Ductile Fracture by the Growth of Holes. Journal of Applied Mechanics Transactions of the Asme, 1968, 35(2), 363-371. |
| 75 | Rice, J.R. and Tracey, D.M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields∗ ☆. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 1969, 17(3), 201-217. |
| 76 | Kanvinde, A.M. and Deierlein, G.G. Void Growth Model and Stress Modified Critical Strain Model to Predict Ductile Fracture in Structural Steels. Journal of Structural Engineering, 1918, 132(12), 1907-1918. |
| 77 | Hancock, J.W. and Mackenzie, A.C. On the mechanisms of ductile failure in high-strength steels subjected to multi-axial stress-states. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 1976, 24(2), 147-160. |
| 78 | Kanvinde, A.M., Fell, B.V., Gomez, I.R. and Roberts, M. Predicting fracture in structural fillet welds using traditional and micromechanical fracture models. Engineering Structures, 2008, 30(11), 3325-3335. |
| 79 | Kanvinde, A.M. and Deierlein, G.G. Finite-Element Simulation of Ductile Fracture in Reduced Section Pull-Plates Using Micromechanics-Based Fracture Models. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(5), 656-664. |
| 80 | Chi, W.M., Kanvinde, A.M. and Deierlein, G.G. Prediction of Ductile Fracture in Steel Connections Using SMCS Criterion. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(2), 171-181. |
| 81 | Kanvinde, A. and Deierlein, G. PREDICTION OF DUCTILE FRACTURE IN STEEL MOMENT CONNECTIONS DURING EARTHQUAKES USING MICROMECHANICAL FRACTURE MODELS. |
| 82 | 郑长卿等. 金属韧性破坏的细观力学及其应用研究. (国防工业出版社, 1995). |
| 83 | 廖芳芳. 钢材微观断裂判据研究及在节点延性断裂预测中的应用. (Tongji University, 2012). |
| 84 | Liao, F., Wang, W. and Chen, Y. Parameter calibrations and application of micromechanical fracture models of structural steels. Structural Engineering & Mechanics, 2012, 42(2), 153-174. |
| 85 | 廖芳芳 and 王伟. Q345钢基于微观机制断裂预测模型的参数校准., 2010. |
| 86 | Wang, Y., Zhou, H., Shi, Y. and Xiong, J. Fracture prediction of welded steel connections using traditional fracture mechanics and calibrated micromechanics based models. International Journal of Steel Structures, 2011, 11(3), 351-366. |
| 87 | Kanvinde, A.M. and Deierlein, G.G. Cyclic Void Growth Model to Assess Ductile Fracture Initiation in Structural Steels due to Ultra Low Cycle Fatigue. Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133(6), 701-712. |
| 88 | Kanvinde, A.M. Micromechanical simulation of earthquake-induced fracture in steel structures. 2004). |
| 89 | Adasooriya, N.D., Siriwardane, S.C. and Ohga, M. A simplified approach to predict the failure of steel members under interaction effect of fracture and fatigue. International Journal of Fatigue, 2013, 47(9), 161-173. |
| 90 | Myers, A.T. Testing and probabilistic simulation of ductile fracture initiation in structural steel components and weldments. Dissertations & Theses - Gradworks, 2009, 38(5), 403. |
| 91 | Kanvinde, A.M. and Deierlein, G.G. Validation of Cyclic Void Growth Model for Fracture Initiation in Blunt Notch and Dogbone Steel Specimens. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(9), 1528-1537. |
| 92 | Fell, B.V., Myers, A.T., Deierlein, G.G. and Kanvinde, A.M. Testing and simulation of Ultra-Low Cycle Fatigue and fracture in steel braces., 2008. |
| 93 | Fell, B.V. Large-scale testing and simulation of earthquake induced ultra low cycle fatigue in bracing members subjected to cyclic inelastic buckling. Dissertations & Theses - Gradworks, 2008. |
| 94 | Myers, A.T., Kanvinde, A.M., Deierlein, G.G., Fell, B.V. and Fu, X. Large Scale Tests and Micromechanics-Based Models to Characterize Ultra Low Cycle Fatigue in Welded Structural Details., pp. 1-162007). |
| 95 | Gurson, A.L. Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I—Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media. Journal of Engineering Materials & Technology, 1977, 99(1), 297-300. |
| 96 | Tvergaard, V. and Needleman, A. ANALYSIS OF THE CUP-CONE ROUND TENSILE FRACTURE., 1984. |
| 97 | Tvergaard, V. On localization in ductile materials containing spherical voids. International Journal of Fracture, 1982, 18(4), 237-252. |
| 98 | 陈志英 and 董湘怀. 基于GTN细观损伤模型的板料成形过程损伤分析. 工程力学, 2009, 26(7), 238-244. |
| 99 | Nègre, P., Steglich, D. and Brocks, W. Crack extension in aluminium welds: a numerical approach using the Gurson–Tvergaard–Needleman model. Engineering Fracture Mechanics, 2004, 71(16–17), 2365-2383. |
| 100 | Besson, J., Steglich, D. and Brocks, W. Modeling of plane strain ductile rupture. International Journal of Plasticity, 2003, 19(10), 1517-1541. |
| 101 | Mahnken, R. Theoretical, numerical and identification aspects of a new model class for ductile damage. International Journal of Plasticity, 2002, 18(7), 801-831. |
| 102 | Leblond, J.B., Perrin, G. and Devaux, J. An improved Gurson-type model for hardenable ductile metals. European Journal of Mechanics - A/Solids, 1995, 14(4), 499-527. |
| 103 | Besson, J. and Guillemer-Neel, C. An extension of the Green and Gurson models to kinematic hardening. Mechanics of Materials, 2003, 35(1–2), 1-18. |
| 104 | Mühlich U, Brocks W. On the numerical integration of a class of pressure-dependent plasticity models including kinematic hardening[J]. Computational Mechanics. 2003, 31(6): 479-488. |

3．研究内容

|  |
| --- |
| 明确研究对象、研究内容及研究范围  3.1 研究对象  本课题主要研究对象为屈曲约束剪切钢板。  3.2 研究内容和研究范围  1）屈曲约束剪切钢板构造形式  研究屈曲约束剪切钢板参数化构造形式，以适应不同工程应用需求；  2）屈曲约束剪切钢板优化  不同形状、尺寸及开洞削弱形式下屈曲约束剪切钢板性能研究；  通过有限元参数分析对不同刚度、强度需求下的剪切钢板进行优化。  3）屈曲约束剪切钢板超低周疲劳试验  研究屈曲约束剪切钢板的超低周疲劳性能和破坏模式；  验证理论模型。  4）声发射损伤评估模型  通过低屈服点钢材性试验建立声发射损伤评估方法；  结合微观机制模型得到基于声发射的断裂因子，建立相应的断裂预测方法；  通过屈曲约束剪切钢板的超低周疲劳试验的声发射检测验证模型正确性。  5）刚度-强度-累积延性解耦设计理论  在原有优化基础上引入环状开孔机制，提出屈曲约束剪切钢板的刚度-强度-累积延性解耦设计理论；  提出参数化设计方法和设计建议。 |

4．拟解决的关键技术或问题

|  |
| --- |
| 明确研究中的关键学术或技术难点，提出解决的方法  1）剪切钢板超低周疲劳损伤机理研究  传统试验方式只能确定剪切钢板最终的破坏模式，对于整个加载过程的损伤发展无法确定；另外通过肉眼甚至简单的显微设备只能观测到宏观裂纹，而对于低周疲劳中重要的塑性损伤却是无法观测的；并且对于屈曲约束剪切钢板，由于面外约束装置的存在，试验过程中无法揭开观测试件。因此可以通过对屈曲约束剪切钢板往复加载试验时进行声发射全程监测，得到构件的实时损伤监测数据，并且通过声发射还能确定损伤源的位置和类型，从多角度探究剪切钢板超低周疲劳的损伤机理。  2）基于声发射和微观机制模型的的断裂因子及断裂预测  声发射能够有效监测试样加载过程中的塑性损伤和微裂纹，但对于最终破坏时的宏观断裂所获得的数据量却较少；微观机制模型是基于空穴扩张的理论模型，对于最终的断裂预测可通过试验得以验证，但损伤过程的机理无法通过试验解释清楚。因此研究基于声发射损伤模型的断裂预测方法重点在于结合微观机制模型，提出相应的断裂因子作为评定断裂的指标，可通过一系列单调和循环材性实验对模型进行标定和修正，并由此推广到屈曲约束剪切钢板的断裂预测中。  3）刚度-强度-累积延性解耦  现有研究中由于影响剪切钢板各项性能的因素较多，因此其各项性能指标容易相互关联，难以满足不同的性能需求。刚度-强度-累积延性解耦设计的重点在于首先对针对不同刚度、强度需求的剪切钢板进行优化，得到不同需求下的最优设计方案，再引入环状开孔机制，通过参数敏感性分析提出一种参数化设计方法，利用若干不同的设计参数实现对各项性能指标的分别控制。可以通过理论研究和有限元分析结合的方法，并通过试验进行验证。 |

5．研究方法

|  |
| --- |
| 5.1选择科学的研究方法，制订完整的技术路线  5.1.1 拟采用研究方法  首先通过有限元软件进行参数分析，得到屈曲约束剪切钢板的优化设计方法；通过数个完整的变参数设计的屈曲约束剪切钢板的超低周疲劳试验进行验证并研究其破坏模式；同时进行LYP225材性试件的单调加载和超低周疲劳循环加载试验，所有试验全程使用声发射设备进行监测，提出基于声发射特征参数的损伤评估方法；结合微观机制模型，提出基于声发射的断裂因子并用于断裂预测，与试验结果对比验证，最后通过引入环状开孔改进剪切钢板局部机制使得其在保证刚度、强度的前提下提高累积延性，从而提出屈曲约束剪切钢板的刚度-强度-累积延性解耦设计理论，并给出参数化设计方法和优化设计建议。  5.12 技术路线    5.2研究方案的可行性分析，预设研究中可能遇到的难点，提出解决的方法  5.2.1 可行性分析  1）屈曲约束剪切钢板的超低周疲劳试验是一种比较成熟的试验方法，试验需要用到的技术设备和装置都较为常规。本课题组在之前研究过程中已经进行过大量类似的超低周疲劳试验。工程结构抗火实验室设备齐全，性能优异，其中多尺寸的竖向和水平向反力架系统以及各种不同规格的作动器满足了本课题研究所需的试验需求，并且已有大量类似试验的经验。  2）声发射检测技术是一项比较成熟的无损检测技术。本课题研究需要用到的声发射检测设备PAC声发射采集系统是美国物理声学公司最为成熟和使用广泛的一套设备。本课题组之前也有相关类似的声发射采集试验的经验，并进行过大量前期研究，因此声发射技术的有效性能够得到保证。  3）研究中需要用到通用有限元程序ABAQUS是世界最著名最为成熟的通用有限元程序，能够模拟各种复杂的线性、非线性问题，对于金属材料的非线性分析提供了合适的材料模型和单元模型。已有大量类似的构件分析案例证明其准确性，因此此采用ABAQUS来进行屈曲约束剪切钢板的性能分析和参数分析是可行的。  5.2.2预设研究中可能遇到的难点，提出解决的方法  **1）有限元模型中微观机制模型引入**  在考虑微观机制模型分析构件的断裂时，有限元分析时如何引入微观机制模型的损伤判据成为一个难点。研究中需要编写相关子程序实现微观机制模型的引入。  **2）声发射数据量巨大**  声发射采集到的数据量十分巨大，且会夹杂环境和设备噪声使得数据的准确性受到影响。因此需要在采集原始数据后对所有数据进行分离和过滤，剔除噪声及一些无用信号，仅保留有用信息。 |

6．预期成果和结论

|  |
| --- |
| 对研究问题的解答进行科学预设，提出预期的创造性成果  1）屈曲约束剪切钢板优化设计方法  通过不同的形状尺寸以及开洞形式对屈曲约束剪切钢板进行优化设计，以满足不同的强度、刚度、延性和耗能能力4大性能需求；  2）基于声发射的断裂因子和断裂预测  利用声发射技术结合微观机制模型可以实现对剪切钢板在超低周疲劳下的断裂预测和定位；  3）基于声发射的损伤评估  利用声发射技术实现对屈曲约束剪切钢板的损伤评估，通过材性试验和完整钢板试验确定适合用于损伤评估的声发射特征参数和模型；  4）刚度-强度-累积延性解耦设计理论  提出屈曲约束剪切钢板的刚度-强度-累积延性的解耦设计理论，实现可参数化设计的剪切钢板设计方法，以满足不同的工程需求。 |

7．研究基础

|  |
| --- |
| 7.1科学评估研究条件和实验条件以及自己的专业基础和导师的专业把控能力  7.1.1 研究条件和试验条件  同济大学图书馆提供EI Compendex、Springer Link、Web of Science、Elsevier收录的国际期刊，万方数字资源系统，维普中国科技期刊，中国知网（CNKI）收录的国内期刊以及学位、会议论文的原文，还提供了文献传递服务以满足稀缺文献的需求。  本人所在的同济大学多高层钢结构及钢结构抗火研究室，拥有多名科研扎实，经验丰富的指导教师，且研究室在金属消能构件方面已经开展了较为系统的研究，并已培养出多名相关领域的研究生，师生共同积累了大量的研究经验，并取得了系列研究成果，积累的经验可供借鉴。  本研究的试验部分拟在同济大学工程结构抗火实验室进行，该实验室设备齐全，性能优异，其中多尺寸的竖向和水平向反力架系统以及各种不同规格的作动器满足了本课题研究所需的试验需求；应变片和位移计，以及力传感器和配套软件都配备齐全。试验室场地充足，组织管理严密，工人技术熟练，可以协助完成本课题计划的试验。  7.1.2 本人的专业基础  本人已完成同济大学直博生的课程学习要求，其中结构动力学、高等钢结构等课程提供了研究屈曲约束剪切钢板理论和试验基础；数值分析、有限单元法、弹塑性力学、非线性有限元分析等课程提供了基本的分析方法，通用有限元ANSYS、ABAQUS等课程提供了有限元软件的操作技能。以上课程为该研究提供了专业基础。  在课程学习期间进行了大量文献阅读，已研习了剪切钢板的相关已有研究，基本明确了课题思路和技术路线。此外参与了研究室的若干试验研究，提高了试验操作技能并积累了一定经验。  7.1.3 导师的专业把控能力  导师孙飞飞教授多年从事多高层钢结构、钢结构抗震等方面的研究，尤其在金属消能构件方面成果颇丰，形成了一套完整的研究体系，并已指导多名研究生从事相关领域的研究并取得优秀成果。因此对于本研究涉及的屈曲约束剪切钢板的研究，导师能够准确把握课题方向，并对可能遇到的问题提出指导性意见。  7.2所需经费，经费来源，开支预算（工程设备、材料须填写名称、规格、数量）  所需的经费主要为文献资料的下载及打印费用、试件原材料、试件加工制作费、试件运输安装费、试验实施费和交通费等。  开支预算：  调研经费 　　 2000元  资料费 　　 2000元  试验原材料 10000元  试件制作加工等 6000元  试验室实施费 　 10000元  论文复印、装订费 2000元  其它费用 5000元  共计： 　　　　 37000元  经费来源为国家十三五重点研发计划课题2016YFC0701203。 |

8．工作计划（含实验、实践、写作）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **序号** | **阶段及内容** | **工作量估计**  **（时数）** | | **起讫日期** | **阶段成果形式** |
| 1 | 建立屈曲约束剪切钢板有限元模型并进行参数分析 | 3个月 | | 2017.11~2018.1 | 期刊论文 |
| 2 | 进行LYP225钢材材性试件单调和循环加载试验，处理声发射数据 | 2个月 | | 2018.2~2018.3 | 试验报告、数据分析、初步结果 |
| 3 | 提出基于声发射特征参数的损伤评估模型 | 2个月 | | 2018.4~2018.5 | 期刊论文 |
| 4 | 进行屈曲约束剪切钢板超低周疲劳实验，同时进行声发射数据采集 | 3个月 | | 2018.6~2018.8 | 实验报告、期刊论文 |
| 5 | 根据试验结果验证有限元模型并进行修正 | 1个月 | | 2018.9~2018.9 | 准确有限元结果 |
| 6 | 结合微观机制模型提出断裂因子和断裂预测方法 | 4个月 | | 2018.10~2019.1 | 损伤模型 |
| 7 | 验证试验实际断裂情况与声发射损伤模型断裂预测的准确性并进行模型修正 | 2个月 | | 2019.2~2019.3 | 期刊论文 |
| 8 | 基于已有理论和试验研究提出性能解耦设计理论以及参数化设计方法 | 4个月 | | 2019.4~2019.7 | 期刊论文 |
| 9 | 博士学位论文整理 | 4个月 | | 2019.8~2019.11 | 学位论文初稿 |
| 10 | 论文修改与答辩 | 3个月 | | 2019.12~2020.3 | 学位论文 |
|  |  | **合计** | 28个月 |  |  |

9．同济大学博士研究生学位论文开题报告评分表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 评审项目 | 权重 | 评 分 标 准 | | 得分  (百分制) |
| A.研究问题 | 20% | 80~100分 | 研究问题明确，具有很强的理论意义或实用价值，并预期将获得重大的社会、经济、文化影响。 |  |
| 60~80分 | 研究问题明确，具有较强的理论意义或实用价值，并预期获得较大的社会、经济、文化影响。 |
| 60分以下 | 研究问题不明确。 |
| B.文献阅读量 | 10% | 80~100分 | 文献阅读量在100篇以上，外文文献占50%。 |  |
| 60~80分 | 文献阅读量在50篇以上，外文文献占30%。 |
| 60分以下 | 文献阅读量在50篇以下。 |
| C.文献综述 | 10% | 80~100分 | 报告内容全面阐述该研究方向的现状和发展动态。 |  |
| 60~80分 | 报告内容基本跟踪该研究方向的现状和发展动态。 |
| 60分以下 | 综述一般，未达到上述标准。 |
| D.创新性 | 30% | 80~100分 | 研究问题/成果前沿，研究成果具有很强的创新性。 |  |
| 60~80分 | 研究问题属本学科的发展方向，有自己独特的思考、并具有一定的创新性。 |
| 60分以下 | 研究成果的创新性不明显。 |
| E.研究方法 | 20% | 80~100分 | 研究方法科学合理，条理清楚，针对性强。 |  |
| 60~80分 | 制定了明确的研究方法，有针对性。 |
| 60分以下 | 研究方法不明确。 |
| F.报告表达 | 10% | 80~100分 | 报告严密、逻辑性强、文字流畅，表达清楚。 |  |
| 60~80分 | 基本概念清晰、层次分明。表达较清楚。 |
| 60分以下 | 表达较差。 |
| 总分 |  | 总分=0.2A+0.1B+0.1C+0.3D+0.2E+0.1F | |  |

注：评审专家按百分制在六项指标每一栏的最后一列内打分。

评审小组组成：

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 组成 | 姓名 | 职称 | 单位 |
| 组长 |  |  |  |
| 成员 |  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

注：此评分表作为博士研究生课程成绩单必备的材料之一

10．评审意见

|  |
| --- |
| 导师（或导师组）对本课题的评价  导师签名  年 月 日 |
| 评审小组的审查结论  组长 组员  年 月 日 年 月 日 |
| 学科专业委员会意见  负责人签名  年 月 日 |