

强度匹配对梁柱焊接接头在地震作用下损伤性能的影响

李 杰， 张玉凤， 霍立兴， 王东坡

(天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072)



李 杰

摘 要: 针对抗震钢结构的梁柱焊接接头建立了符合损伤指数定义的加权线性组合双参数模型, 并给出了在模拟地震循环载荷作用下, 焊接接头累积损伤指数的计算方法。使用 ANSYS 软件对钢结构焊接接头建立了实体模型, 在模拟地震循环载荷作用下进行了弹塑性有限元分析, 得到了在不同匹配情况下焊接接头的塑性应变, 据此计算了高匹配和等匹配条件下焊接接头的累积损伤指数。计算结果表明, 在循环载荷作用下, 高匹配焊缝的损伤要小于等匹配焊缝的损伤。

关键词: 强度匹配; 累积损伤; 有限元; 焊接接头

中图分类号: TG404 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2003)01-27-04

0 序 言

1994 年美国北岭地震和 1995 年日本阪神地震中, 数百幢高层钢结构的焊接节点遭到严重破坏, 引起了工程界的极大关注。震害调查研究表明, 在地震作用下, 钢结构的失效破坏大多起始于焊接接头, 所以焊接接头是影响钢结构整体抗震性能的薄弱环节^[1]。而确定焊缝金属的强度, 即焊缝金属与母材的强度匹配是焊接结构的设计首先要解决的问题之一。

由于钢结构在地震作用下会产生大量的塑性变形和塑性应变, 具有一定的低周疲劳特性, 所以目前钢结构的抗震设计通常允许结构在地震作用下有一定程度的损伤, 针对结构的累积损伤, 国外对此进行了大量研究并建立了若干累积损伤模型(Kachnov 1986, Lemaitre 和 Chatoche 1985)。到目前为止, 针对焊接接头的抗震研究主要集中在如何防止结构的脆性断裂和结构的优化设计等方面, 还没有人针对抗震焊接接头在地震循环载荷作用下的累积损伤提出实用的损伤模型。有鉴于此, 作者以有限元分析为基础, 基于焊接接头在地震循环载荷作用下的塑性应变提出了焊接接头的累积损伤计算模型, 并计算了高匹配和等匹配焊接接头在模拟地震循环载荷作用下的累积损伤指数, 对焊缝强度匹配效应对接头累积损伤的影响进行了研究。

1 焊接接头的力学性能匹配

焊接接头的力学性能与母材和焊缝金属之间的强度如何组配有关, 强度匹配分为高强匹配、等强匹配和低强匹配, 其示意图见图 1。

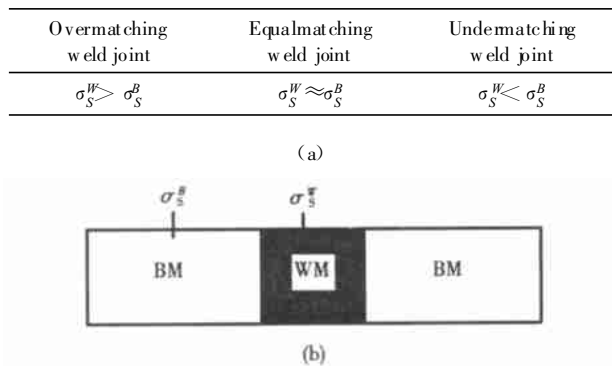


图 1 强度匹配示意图

Fig. 1 Scheme of intensity match
(BM: base metal; WM: weld metal)

对于不同的匹配, 其接头应力-应变关系曲线见图 2。

2 钢结构焊接接头的地震损伤模型

结构或构件的损伤模型通常用损伤指数 DM 来表示, 其一般表达式^[2]为

$$DM=f(\Delta_1, \Delta_2, \cdots, \Delta_n), \tag{1}$$

式中: $\Delta_1, \Delta_2, \cdots, \Delta_n$ 是反映结构力学性能变化的参数, 称为损伤参数。损伤指数 DM 应具有如下性质。

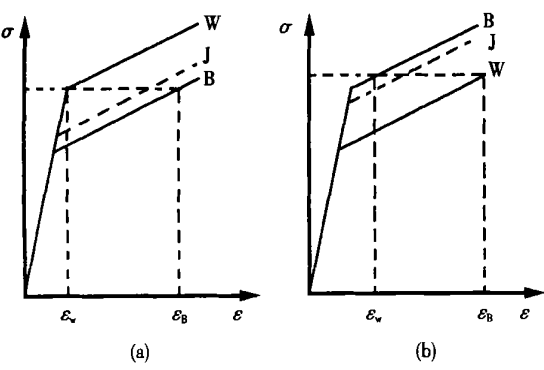


图 2 焊接接头不同匹配的应力—应变关系
Fig. 2 Stress-strain curves of overmatching and undermatching weld joint
(W: σ — ϵ curve of weld metal; B: σ — ϵ curve of base metal; J: σ — ϵ curve of welded joint)

(1) 损伤指数 DM 的范围应在 $[0, 1]$ 之间。当 $DM=0$ 时, 对应无损状态; 当 $DM=1$ 时, 表示结构或构件完全破坏; 当 $0 < DM < 1$ 时, 表示结构不同程度的损伤状态。

(2) 损伤指数 DM 应为单调递增函数, 即结构损伤向着增大的方向发展, 且损伤不可逆。

为了符合损伤指数的定义以及模型的通用性, 并便于进行地震损伤性能设计, 文中引入如下的加权线性组合地震损伤模型^[3], 即

$$DM = (1 - \beta) \frac{\epsilon_m^p}{\epsilon_u^p} + \beta \sum_{i=1}^n \frac{\epsilon_i^p}{\epsilon_u^p}, \quad (2)$$

$$E^D = (1 - \xi_1 D) E, \quad (3)$$

$$\sigma_S^D = (1 - \xi_2 D) \sigma_S, \quad (4)$$

$$(k^{(n)}) = k_0 + \xi_3 \sum_{i=1}^n \frac{\epsilon_i^p}{\epsilon_u^p}, \quad (5)$$

式中: ϵ_m^p 为载荷对结构造成的最大塑性应变; ϵ_i^p 为第 i 个半周循环时的塑性应变; ϵ_u^p 为材料的极限塑性应变; β 为权重; E 和 E^D 分别为当 $DM=0$ 和 $DM=D$ 时的弹性模量; k_0 为初始应变强化系数; $k^{(n)}$ 为 n 个半周循环以后, 材料的应变强化系数; ξ_1, ξ_2, ξ_3 为与材料本身有关的常数。

3 有限元分析

根据许多学者的研究, 循环应力—应变曲线也可以用与单调应力—应变曲线相似的公式表达^[4], 即

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'} \right)^{1/n'}, \quad (6)$$

式中: σ 与 ϵ 分别为循环应力幅和循环全应变幅; K' 为循环强度系数; n' 为循环应变硬化指数。翼缘焊缝母材与焊缝金属的饱和循环特性见图 3^[5]。

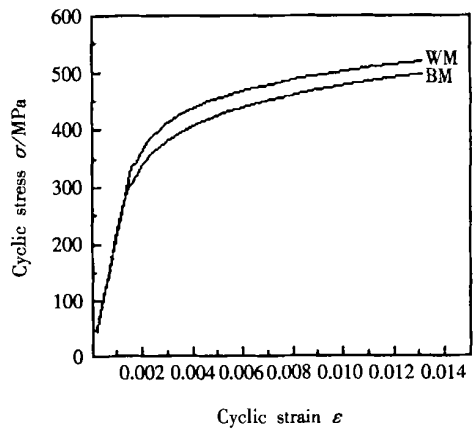


图 3 16Mn 焊接接头母材与焊缝金属的饱和循环特性曲线
Fig. 3 Cyclic stress-strain curve of weld and base metal of 16Mn welded joint

文中有限元计算的刚性梁柱节点取自《建筑抗震设计手册》, 柱、梁截面分别为热轧 H 型钢 HK 400 mm×300 mm×13.5 mm×24 mm 及 HZ 550 mm×210 mm×11.1 mm×17.2 mm^[6], 梁跨度 L 为 3.4 m。所用材质均为 16Mn 钢, 梁翼缘与柱为熔透焊, 高匹配时, 焊条为结 507 型, 梁腹板与柱上连接板以 M 20×10.9 级高强螺栓连接。焊缝细部构造见图 4。

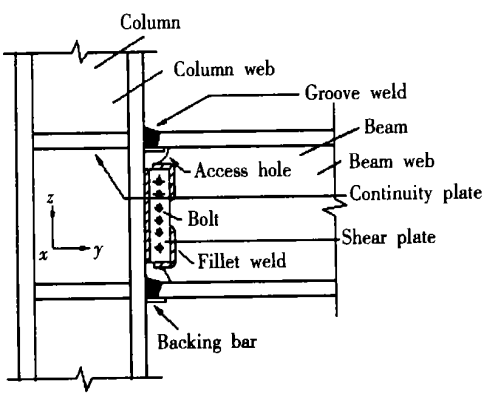


图 4 焊缝细部构造图
Fig. 4 Details of welded joints

有限元分析以图 4 所示的梁柱框架焊接节点为分析原型, 对翼缘焊缝不同强度匹配(高匹配、等匹配)进行数值分析。分析时翼缘焊接接头简化为焊缝金属与母材金属两部分组成, 忽略了焊接缺陷、

残余应力以及热影响区的影响。单元类型为 8 节点块单元,根据结构的对称性,取 1/2 梁和 1/4 柱建立实体模型,共有 4 964 个节点,2 638 个单元,有限元模型如图 5 所示。计算中材料非线性按 Von mises 屈服准则及其相关流动法则处理,采用幂硬化和多线性随动强化准则。在等匹配分析过程中接头按均质材料处理。梁柱框架材质为 16Mn,接头材料力学性能见表 1^[39]。有限元分析时循环载荷的加载点为梁端,方向为铅垂向,以振幅递增的循环载荷模拟地震荷载,循环加载历程如图 6 所示。每个循环之间环载荷的增量为 10 kN。

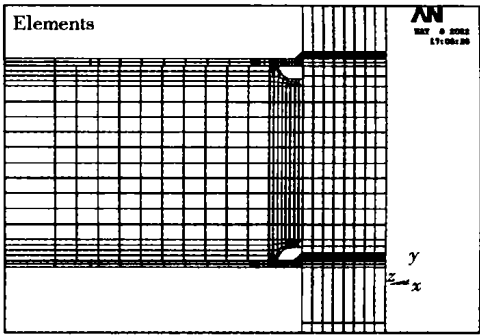


图 5 有限元分析模型
Fig.5 FEM model of welded connection

表 1 焊接接头各区材料力学性能参数

Table1 Mechanical properties for different zone in welded joints

	Cyclic yield strength σ_{yc}/MPa	Cyclic strength factor K'/MPa	Strain hardening exponent n'	Young's modulus E/MPa	Poisson's ratio ν	Yield strain ϵ_s	Ultimate strain ϵ_u	Weight number β
WM	338.3	822.3	0.101	2.1×10^5	0.3	0.001 611	0.241 85	0.008 1
BM	265.8	869.3	0.123	2.1×10^5	0.3	0.001 266	0.241 85	0.008 1

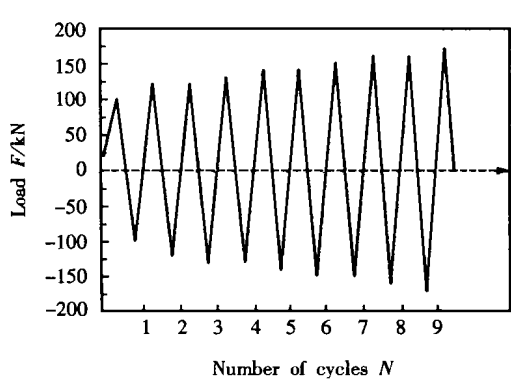


图 6 循环载荷—时间历程曲线
Fig.6 Cyclic load time curves

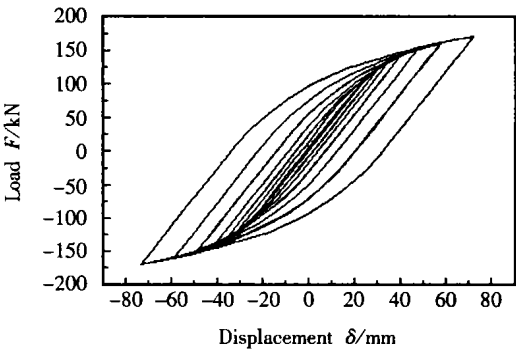
4 有限元分析结果与损伤指数

4.1 载荷—位移滞回曲线

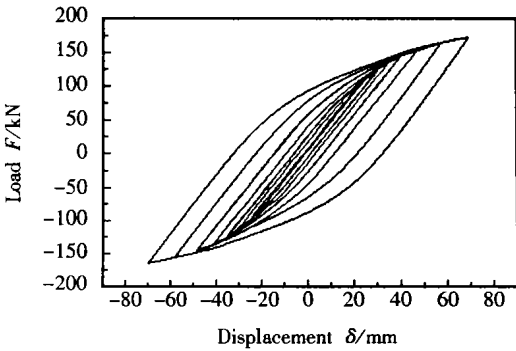
在等匹配(A)和高匹配(B)情况下,对循环载荷作用下的结构进行了有限元分析,得到了梁端加载点的载荷—位移滞回曲线,见图 7。从图中可以看出,二者对地震能量的耗散能力基本相同,无较大差别。

4.2 焊接接头的累积损伤指数

通过 ANSYS 软件进行有限元分析,得到了焊缝的塑性应变,见图 8。据此计算了两种不同强度匹配情况下焊接节点的累积损伤指数,见图 9。从图 8b 可以看出当外加载荷或加载点位移较小时,在



(a) Equalmatching weld joint

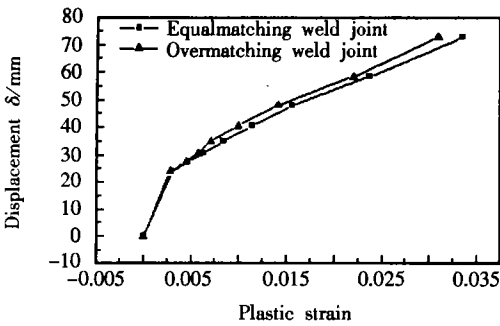


(b) Overmatching weld joint

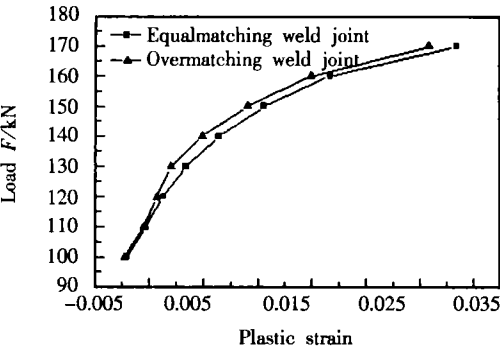
图 7 梁端加载点的载荷—位移滞回曲线

Fig.7 Hysteresis loops of welded connection

不同强度匹配的情况下,焊缝处应变的差异较小,随着载荷的增加,焊缝应变的差异也随之增加。在高匹配的情况下,焊缝应变要小于等匹配情况下焊缝



(a) Displacement-strain curve



(b) Load-strain curve

图 8 位移—应变以及载荷—应变曲线

Fig. 8 Displacement-strain curve & load-strain curve

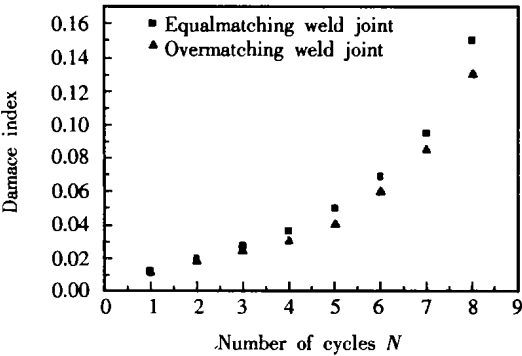


图 9 损伤指数的比较

Fig. 9 Comparation of damage index

的应变。图 9 所示为不同循环周次的条件下,高匹配与等匹配焊缝的累积损伤,从图中可以看出,当塑性变形较小时,二者之间的差异也较小,随着循环次数的增加,塑性变形的加大,累积损伤的差距也逐渐增加。通过以上分析,可以得出在塑性阶段,强度匹配对焊缝累积损伤的影响较为明显,可以降低焊缝的损伤。

5 结 论

提出了焊接接头在模拟地震循环载荷作用下的加权线性组合双参数累积损伤模型,并计算了高匹配与等匹配条件下焊接节点的损伤指数。计算结果表明,在循环载荷作用下,高匹配焊缝的损伤要小于等匹配焊缝的损伤。

参考文献:

[1] 李国强,孙飞飞,沈祖炎.强震下钢框架梁柱焊接连接的断裂行为[J].建筑结构学报,1998,19(3):26~29.
[2] 吕大刚,王 光.远基于损伤性能的抗震结构最优设防水准的决策方法[J].土木工程学报,2001,34(1):45~48.
[3] Zuyan Shen, Rongyi Chen. Acumulative damage mechanic model of steel for low-cycle fatigue fracturq[A]. Proceedings of sixth pacific structural steel conference, octobe[C]. China; Beijing, 2001. 388~391
[4] 赵少汴,王忠保.抗疲劳设计—方法与数据[M].北京:机械工业出版社,1997.
[5] 王立军.焊趾缺口效应及其疲劳裂纹扩展的统计分析[D].天津:天津大学,1990.
[6] 姚国春.地震载荷下焊接钢结构梁柱节点断裂行为的研究[D].天津:天津大学,2001.

作者简介:李 杰,男,1973 年 3 月出生,博士研究生。主要研究方向为焊接钢结构抗震性能。发表论文 4 篇。

Email: jacksonjie-li@eyou.com