



T/CECS 1057—2022

中国工程建设标准化协会标准

活性粉末混凝土加固钢结构 技术规程

Technical specification for strengthening steel
structure with reactive powder concrete

目 次

1	总 则	(1)
2	术语和符号	(2)
2.1	术语	(2)
2.2	符号	(2)
3	基本规定	(7)
4	材 料	(9)
4.1	活性粉末混凝土	(9)
4.2	钢材及焊接材料	(11)
5	计 算	(13)
5.1	一般规定	(13)
5.2	正截面受弯承载力计算	(16)
5.3	正截面受压承载力计算	(19)
5.4	斜截面受剪承载力计算	(22)
5.5	裂缝宽度验算	(23)
5.6	受弯构件挠度计算	(25)
6	构 造	(27)
6.1	全截面加固	(27)
6.2	薄层加固	(31)
7	施 工	(32)
7.1	一般规定	(32)
7.2	界面处理	(33)
7.3	钢筋安装	(33)
7.4	浇筑、抹压和喷射活性粉末混凝土	(34)
7.5	养护	(36)

8	检验和验收	(37)
8.1	一般规定	(37)
8.2	原材料检验	(38)
8.3	界面处理	(39)
8.4	钢筋分项工程	(40)
8.5	活性粉末混凝土分项工程	(42)
附录 A	活性粉末混凝土加固钢结构质量验收记录	(46)
	用词说明	(49)
	引用标准名录	(50)
	附:条文说明	(51)

Contents

1	General provisions	(1)
2	Terms and symbols	(2)
2.1	Terms	(2)
2.2	Symbols	(2)
3	Basic requirements	(7)
4	Materials	(9)
4.1	Reactive powder concrete	(9)
4.2	Steel and welding materials	(11)
5	Calculation	(13)
5.1	General requirements	(13)
5.2	Flexural capacity of normal section	(16)
5.3	Compressive capacity of normal section	(19)
5.4	Shear capacity of oblique section	(22)
5.5	Crack width calculation	(23)
5.6	Deflection calculation of bending member	(25)
6	Structure	(27)
6.1	Cross section layer strengthening	(27)
6.2	Thin layer strengthening	(31)
7	Construction	(32)
7.1	General requirements	(32)
7.2	Interface treatment	(33)
7.3	Steel bars setting	(33)
7.4	Cast and spray reactive powder concrete	(34)
7.5	Curing	(36)

8	Inspection and acceptance	(37)
8.1	General requirements	(37)
8.2	Raw material inspection	(38)
8.3	Interface treatment	(39)
8.4	Steel bars item project	(40)
8.5	Item project of reactive powder concrete	(42)
Appendix A	Quality acceptance record for strengthening steel structure with reactive powder concrete	(46)
	Explanation of wording	(49)
	List of quoted standards	(50)
	Addition: Explanation of provisions	(51)

1 总 则

1.0.1 为规范活性粉末混凝土加固钢结构的技术要求,提高工程质量,做到安全适用、技术先进、经济合理、低碳环保、施工简便,制定本规程。

1.0.2 本规程适用于采用活性粉末混凝土对工业与民用建筑钢结构进行加固的设计、施工、检验及验收。

1.0.3 采用活性粉末混凝土加固钢结构前,应按现行国家标准《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344 和《钢结构现场检测技术标准》GB/T 50621 的有关规定进行结构检测,并应根据建筑物和构筑物的种类,分别按现行国家标准《民用建筑可靠性鉴定标准》GB 50292 和《工业建筑可靠性鉴定标准》GB 50144 的有关规定进行结构鉴定。当需要进行抗震加固时,尚应按现行国家标准《建筑抗震鉴定标准》GB 50023 的有关规定进行抗震鉴定。

1.0.4 采用活性粉末混凝土加固钢结构的设计、施工、检验及验收,除应符合本规程规定外,尚应符合国家现行有关标准和现行中国工程建设标准化协会有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 活性粉末混凝土 reactive powder concrete

以水泥、矿物掺合料等活性粉末材料、细骨料、外加剂、高强度微细钢纤维和水等原料生产的具有超高性能的混凝土材料。

2.1.2 加固层 strengthening layer

通过浇筑、抹压或喷射活性粉末混凝土,在原结构构件表面与钢筋共同形成的面层。

2.1.3 原结构构件 existing structural member

需要实施加固的目标结构或构件。

2.1.4 薄层加固 thin layer strengthening

在钢结构构件表面浇筑、抹压或喷射厚度为 20mm~35mm 的活性粉末混凝土,仅配置箍筋或不设箍筋,形成与原结构构件截面形状相同的加固层。

2.1.5 全截面加固 cross section layer strengthening

在钢结构构件外侧新增厚度不小于 35mm 的活性粉末混凝土,并配置纵向钢筋、箍筋,形成外包于原结构构件外侧的实腹矩形截面的加固层。

2.1.6 销钉 dowel

为增强加固层与原结构构件之间抵抗剪切变形、滑移或剥离的能力,在原结构构件钢材表面焊接的直钩形带肋短钢筋。

2.2 符 号

2.2.1 材料性能:

E_s 、 E_c ——型钢、活性粉末混凝土的弹性模量;

- E_s ——钢筋弹性模量；
- f_s, f'_s ——型钢抗拉和抗压强度；
- f_y, f'_y ——钢筋抗拉和抗压强度；
- f_{ck}, f_c ——活性粉末混凝土轴心抗压强度标准值、设计值；
- f_{tk}, f_t ——活性粉末混凝土轴心抗拉强度标准值、设计值；
- f_{yv} ——箍筋的屈服强度；
- f'_l ——箍筋侧向约束应力。

2.2.2 作用和作用效应：

- M_{aw} ——型钢腹板承受的轴向合力对型钢受拉翼缘和受拉钢筋合力作用点的力矩；
- M_{cr} ——梁截面抗裂弯矩；
- M_q ——按荷载效应的准永久值计算的弯矩值；
- N ——轴向压力设计值；
- N_{aw} ——型钢腹板承受的轴向合力；
- ΔN_{cc} ——箍筋约束作用下核心区活性粉末混凝土提高的荷载；
- N_d ——双向偏心压力设计值；
- N_{ux}, N_{uy} ——柱截面 x 轴和 y 轴方向的单向偏心受压承载力设计值；
- N_{u0} ——柱截面的轴心受压承载力设计值；
- R ——构件承载力设计值；
- S ——构件内力组合设计值；
- V ——受剪承载力；
- σ_s, σ_a ——受拉或受压较小边的钢筋和型钢翼缘应力；
- σ_{sa} ——钢筋应力值。

2.2.3 几何参数：

- A_{af}, A'_{af} ——型钢受拉和受压截面翼缘面积；
- A_{aw} ——型钢受拉钢腹板面积；
- A_c ——活性粉末混凝土截面面积；

- A_e ——有效约束核心区活性粉末混凝土的面积；
 A_s, A'_s ——钢筋受拉和受压截面面积；
 A_{sv} ——箍筋截面面积；
 a ——型钢受拉翼缘与受拉钢筋合力作用点至截面受拉边缘的距离；
 a_a, a_s ——受拉区钢筋、型钢翼缘合力作用点到截面受拉边缘的距离；
 a'_s, a'_a ——受压区钢筋、型钢翼缘合力作用点到截面受压边缘的距离；
 B ——长期刚度；
 B_s ——短期刚度；
 b ——截面宽度；
 b_f, t_f ——受拉翼缘宽度、厚度；
 b_s, d —— x, y 方向箍筋两肢中心线的间距；
 c_s ——最外层纵向受拉钢筋的保护层厚度；
 d_e ——有效直径；
 d_s ——纵向受拉钢筋的直径；
 e ——轴力作用点至纵向受拉钢筋和型钢受拉翼缘的合力作用点之间的距离；
 e_a ——附加偏心距；
 e_i ——初始偏心距；
 e_0 ——轴向力对截面重心的偏心距；
 h ——截面高度；
 h_w ——型钢腹板高度；
 h_0 ——截面有效高度；
 h_{0s}, h_{0f}, h_{0w} ——纵向受拉钢筋、型钢受拉翼缘、型钢腹板重心至混凝土截面受压边缘的距离；
 I_a ——型钢截面惯性矩；
 I_c ——活性粉末混凝土截面惯性矩；

- i ——截面最小回转半径；
- l_0 ——构件计算长度；
- s ——箍筋间距；
- s' ——柱身约束区箍筋间距；
- t'_f ——受压翼缘厚度；
- t_w ——型钢腹板厚度；
- u ——纵向受拉钢筋和型钢受拉翼缘与部分腹板周长之和；
- x ——活性粉末混凝土等效受压区高度；
- ξ_b ——相对界限受压区高度；
- ω_{\max} ——受弯构件的最大裂缝宽度。

2.2.4 计算系数及其他：

- k ——型钢腹板影响系数；
- k_e ——箍筋约束混凝土的有效约束效应系数；
- n ——纵向受拉钢筋数量；
- α ——受压区活性粉末混凝土应力影响系数；
- β_c ——活性粉末混凝土强度影响系数；
- β_1 ——受压区活性粉末混凝土应力图形影响系数；
- γ_{RE} ——承载力抗震调整系数；
- γ_0 ——构件的重要性系数；
- δ_1 ——型钢腹板上端到截面上边缘的距离与 h_0 的比值；
- δ_2 ——型钢腹板下端到截面上边缘的距离与 h_0 的比值；
- θ ——荷载长期作用对挠度增大的影响系数；
- λ ——计算剪跨比；
- ρ ——配箍率；
- ρ_s ——纵向受拉钢筋的配筋率；
- ρ_{sa} ——根据截面受拉区纵向受拉钢筋和型钢受拉翼缘面积之和计算的截面配筋率；
- ρ'_{sa} ——根据截面受压区纵向受压钢筋和型钢受压翼缘面

积之和计算的截面配筋率；

ρ_{te} ——计入型钢受拉翼缘、部分腹板及受拉钢筋的有效配筋率；

φ ——轴心受压构件稳定系数；

φ' ——计入型钢翼缘作用的钢筋应变不均匀系数；

ψ ——受弯钢构件初始应力比折减系数；

ψ' ——偏心受压构件初始应力比折减系数；

ψ'' ——受剪构件初始应力比折减系数。

3 基本规定

3.0.1 在加固设计、施工、检验和验收前,应了解下列工程信息:

- 1 结构或构件的类型、部位、名称;
- 2 加固目的;
- 3 加固范围;
- 4 原结构构件现状。

3.0.2 加固后钢结构的安全等级,应根据结构构件破坏后果的严重性、结构构件的重要性和使用要求确定。

3.0.3 加固范围应根据钢结构的现状和加固目的确定,加固设计应对相邻区段的构件和节点的内力和变形进行复核。

3.0.4 对加固过程中可能出现超载、倾斜、失稳、过大变形的钢结构,加固前应设置安全措施。

3.0.5 对抗震设防区的结构构件进行加固时,除应满足承载力要求外,尚应进行抗震能力复核。抗震加固应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定,且结构中不应存在因局部加强或刚度突变形成的新的薄弱部位。

3.0.6 采用活性粉末混凝土加固后,钢构件的承载力提高幅度应符合下列规定:

1 对于轴心受压或端部弯矩 M 与轴向压力 N 之比小于偏心方向截面尺寸的 $1/6$ 的偏心受压构件,加固时承载力提高幅度不超过 200% ;

2 对于端部弯矩 M 与轴向压力 N 之比大于或等于偏心方向截面尺寸的 $1/6$ 的偏心受压构件,加固时承载力提高幅度不应超过 150% ;

3 受弯构件加固时,正截面承载力提高幅度不应超过 150% ;

4 受弯构件加固时,斜截面承载力提高幅度不应超过 200%。

3.0.7 采用活性粉末混凝土加固后的钢结构设计使用年限,不应超过原结构设计使用年限。达到设计使用年限后仍需要继续使用时,应重新进行可靠性鉴定。

3.0.8 采用活性粉末混凝土加固后的钢结构,其服役期间应持续检查工作状态,第一次检查的时间间隔不宜超过 10 年,后续每次检查的时间间隔不宜超过 5 年。

4 材 料

4.1 活性粉末混凝土

4.1.1 制备活性粉末混凝土的胶凝材料应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的有关规定,水泥宜采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥,粉煤灰宜采用 I 级,粒化高炉矿渣粉宜采用 S95 及以上等级,钢铁渣粉宜采用 G85 及以上等级。

4.1.2 骨料应采用单粒级石英砂,且应符合表 4.1.2-1 的规定,不同粒级石英砂的超粒径颗粒含量应符合表 4.1.2-2 的规定。

表 4.1.2-1 石英砂的技术指标 (%)

项目	技术指标
二氧化硅含量	≥ 97
氯离子含量	≤ 0.02
硫化物及硫酸盐含量	≤ 0.50
云母含量	≤ 0.50

表 4.1.2-2 不同粒级石英砂的超粒径颗粒含量

粒级 (mm)		超粒径颗粒含量 (%)
1.25~0.63	≥ 1.25	≤ 5
	< 0.63	≤ 10
0.63~0.315	≥ 0.63	≤ 5
	< 0.315	≤ 10
0.315~0.16	≥ 0.315	≤ 5
	< 0.16	≤ 5

4.1.3 减水剂宜采用减水率大于 30% 的产品。

4.1.4 钢纤维的性能指标应符合表 4.1.4 的规定。

表 4.1.4 钢纤维的性能指标

项目	性能指标
抗拉强度(MPa)	≥ 2000
50 根试样中长度平均值在 12mm~16mm 范围内的纤维比例(%)	≥ 96
50 根试样中直径平均值在 0.18mm~0.22mm 范围内的纤维比例(%)	≥ 90

4.1.5 活性粉末混凝土的水胶比、胶凝材料用量和钢纤维掺量应符合表 4.1.5 的规定。

表 4.1.5 水胶比、胶凝材料用量和钢纤维掺量

强度等级	水胶比	胶凝材料用量 (kg/m^3)	钢纤维掺量体积分数 (%)
RPC100	≤ 0.22	≤ 850	≥ 0.7
RPC120	≤ 0.20	≤ 900	≥ 1.2
RPC140	≤ 0.18	≤ 950	≥ 1.7
RPC160	≤ 0.16	≤ 1000	≥ 2.0
RPC180	≤ 0.14	≤ 1000	≥ 2.5

4.1.6 活性粉末混凝土的力学性能应符合表 4.1.6 的规定。抗压强度试验应采用 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的立方体试件,抗折强度试验应采用 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ 的长方体试件,弹性模量试验应采用 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的长方体试件,试验方法应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的有关规定。

表 4.1.6 活性粉末混凝土的力学性能

强度等级	抗压强度(MPa)	抗折强度(MPa)	弹性模量(GPa)
RPC100	≥ 100	≥ 12	≥ 40
RPC120	≥ 120	≥ 14	≥ 40
RPC140	≥ 140	≥ 18	≥ 40
RPC160	≥ 160	≥ 22	≥ 40
RPC180	≥ 180	≥ 24	≥ 40

4.1.7 活性粉末混凝土轴心抗压强度标准值 f_{ck} 和轴心抗压强度设计值 f_c 应按表 4.1.7 取值。

表 4.1.7 活性粉末混凝土轴心抗压强度标准值和设计值 (MPa)

强度等级	f_{ck}	f_c
RPC100	70	48
RPC120	84	58
RPC140	98	68
RPC160	112	77
RPC180	126	87

4.1.8 活性粉末混凝土轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 和轴心抗拉强度设计值 f_t 应按表 4.1.8 取值。

表 4.1.8 活性粉末混凝土轴心抗拉强度标准值和设计值 (MPa)

强度等级	f_{tk}	f_t
RPC100	5.6	4.0
RPC120	7.0	4.8
RPC140	8.0	5.5
RPC160	8.5	5.9
RPC180	9.0	6.2

4.2 钢材及焊接材料

4.2.1 加固用的钢筋品种、规格、力学性能应满足设计文件的要求,且应符合下列规定:

- 1 宜选用 HRB335 级或 HRB400 级钢筋;
- 2 钢筋的质量应符合现行国家标准《钢筋混凝土用钢 第 2 部分:热轧带肋钢筋》GB/T 1499.2 的有关规定;
- 3 钢筋的强度设计值应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定采用;
- 4 加固用钢筋的力学性能设计值应按现行国家标准《混凝土

结构设计规范》GB 50010 的有关规定采用；

5 有抗震设防要求时，加固用钢筋力学性能复验实测值尚应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的有关规定；

6 加固用钢筋应平直、无损伤，表面不应有裂纹、油污及颗粒状或片状锈斑，不应将弯折钢筋调直后作为受力钢筋使用。

4.2.2 钢材的品种、质量和性能应符合下列规定：

1 强度级别应与原构件钢材相同；

2 韧性、塑性及焊接性能应能与原构件钢材相匹配；

3 钢材质量应符合现行国家标准《碳素结构钢》GB/T 700、《低合金高强度结构钢》GB/T 1591、《建筑结构用钢板》GB/T 19879 的有关规定。

4.2.3 加固用焊接材料型号和质量应符合下列规定：

1 焊条型号应与被焊接钢材的强度相适应；

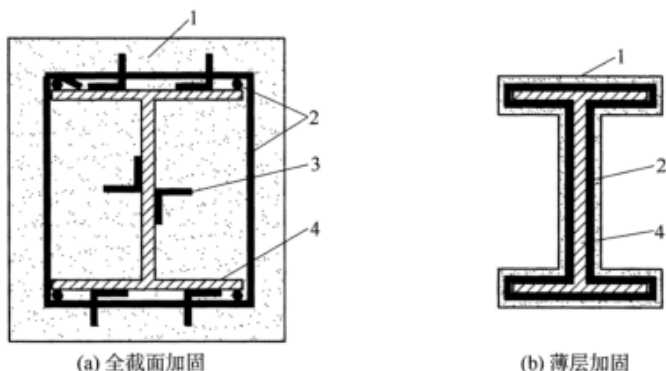
2 焊条的质量应符合现行国家标准《非合金钢及细晶粒钢焊条》GB/T 5117 和《热强钢焊条》GB/T 5118 的有关规定。

4.2.4 销钉宜选用 HRB335 级或 HRB400 级钢筋制作，销钉的规格、型号及性能应符合设计文件的规定。制作销钉的钢筋质量应符合现行国家标准《钢筋混凝土用钢 第 2 部分：热轧带肋钢筋》GB/T 1499.2 的有关规定。

5 计 算

5.1 一般规定

5.1.1 采用活性粉末混凝土加固钢结构时,应根据原构件受力特点、原构件截面形状和加固目的等因素确定加固截面形式。用于提高承载力和刚度时应采用全截面加固[图 5.1.1(a)],用于钢结构表面防护时宜采用薄层加固[图 5.1.1(b)]。



1—活性粉末混凝土加固层;2—加固层新增钢筋;3—锚钉;4—被加固钢结构构件

图 5.1.1 活性粉末混凝土加固钢结构截面形式示意图

5.1.2 活性粉末混凝土加固钢结构正截面承载力应按下列基本假定进行计算:

- 1 截面应变保持平面;
- 2 不计入活性粉末混凝土的抗拉强度;
- 3 钢筋、型钢的应力等于钢筋、型钢的应变与弹性模量的乘积,且应力绝对值不大于材料强度设计值;
- 4 型钢腹板的应力图形简化为等效矩形应力图形;

5 受弯构件、偏心受力构件正截面承载力计算时,活性粉末混凝土的受压区应力分布应简化为等效的矩形应力图块(图 5.1.2),转化系数 α_1 及 β_1 应按表 5.1.2 取值。

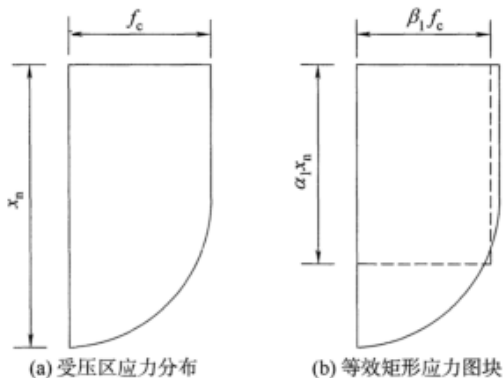


图 5.1.2 受压区等效矩形应力图块示意图

表 5.1.2 转化系数

强度等级	α_1	β_1
RPC100	0.95	0.77
RPC120	0.93	0.76
RPC140	0.92	0.73
RPC160	0.90	0.71
RPC180	0.87	0.70

5.1.3 采用活性粉末混凝土加固钢结构时,应按下列规定进行承载力极限状态和正常使用极限状态的设计和验算:

1 结构上的作用应经调查或检测核实,荷载取值应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的有关规定确定;

2 结构受力条件的计算简图应符合被加固构件和节点的现

有受力条件和构造状况；

3 作用组合的效应设计值和组合值系数，以及作用的分项系数，应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的有关规定确定，并应计入由于实际荷载偏心、结构变形、温度作用、地基不均匀沉降等造成的附加内力；

4 原构件的尺寸宜采用实测值，对新增部分可采用加固设计文件给出的名义值；

5 原构件材料没有产生性能退化且规格、种类、型号满足原设计文件要求时，原构件材料强度可采用原设计文件的标准值；

6 原构件材料存在性能退化时，材料强度宜采用实测值推定的标准值；

7 加固材料的性能应符合本规程第 4.1 节和第 4.2 节的有关规定。

5.1.4 持久、短暂设计状况下，采用活性粉末混凝土加固钢结构的承载力设计应满足下式要求：

$$\gamma_0 S \leq R \quad (5.1.4)$$

式中： γ_0 ——构件的重要性系数，对安全等级为一级的结构构件不应小于 1.1，对安全等级为二级的结构构件不应小于 1.0；

S ——构件内力组合设计值，应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 和《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定进行计算；

R ——构件承载力设计值。

5.1.5 地震设计状况下，采用活性粉末混凝土加固钢结构的承载力设计应满足下式要求：

$$S \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} R \quad (5.1.5)$$

式中： γ_{RE} ——承载力抗震调整系数。

5.1.6 承载力抗震调整系数 γ_{RE} 应按表 5.1.6 取值。

表 5.1.6 承载力抗震调整系数

构件类型	受力特征	γ_{RE}
梁	受弯	0.75
柱	偏压轴压比小于 0.15	0.75
	偏压轴压比不小于 0.15	0.80
	轴压	0.80
	偏拉、轴拉	0.85
其他	受剪	0.85

5.2 正截面受弯承载力计算

5.2.1 正截面受弯承载力(图 5.2.1)应满足下列公式要求:

$$M \leq \alpha \psi f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + 0.9 f'_y A'_s (h_0 - a'_s) + f'_a A'_{af} (h_0 - a'_s) + M_{aw} \quad (5.2.1-1)$$

$$\alpha \psi f_c b x + 0.9 (f'_y A'_s - f_y A_s) + f'_a A'_{af} - f_a A_{af} + N_{aw} = 0 \quad (5.2.1-2)$$

式中: α ——受压区活性粉末混凝土应力影响系数,取 1.0;

ψ ——受弯构件初始应力比折减系数;

f_c ——活性粉末混凝土轴心抗压强度设计值(MPa);

b ——截面宽度(mm);

x ——活性粉末混凝土等效受压区高度(mm);

h_0 ——截面有效高度(mm);

f_y 、 f'_y ——钢筋抗拉和抗压强度(MPa);

A_s 、 A'_s ——钢筋受拉和受压截面面积(mm²);

a'_s 、 a'_s ——受压区钢筋、型钢翼缘合力作用点到截面受压边缘的距离(mm);

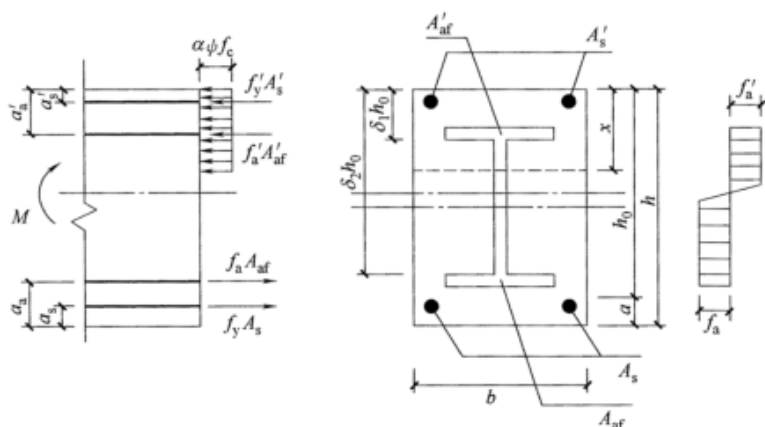
f_a 、 f'_a ——型钢抗拉和抗压强度(MPa);

A_{af} 、 A'_{af} ——型钢受拉和受压截面翼缘面积(mm²);

M_{aw} ——型钢腹板承受的轴向合力对型钢受拉翼缘和受拉钢

筋合力作用点的力矩($N \cdot mm$),应按本规程第 5.2.3 条或 5.2.4 条计算;

N_{aw} ——型钢腹板承受的轴向合力(N)。



a_s, a_s' —受拉区钢筋、型钢翼缘合力作用点到截面受拉边缘的距离;
 a —型钢受拉翼缘与受拉钢筋合力作用点至截面受拉边缘的距离;
 h —截面高度; δ_1 —型钢腹板上端到截面上边缘的距离与 h_0 的比值;
 δ_2 —型钢腹板下端到截面上边缘的距离与 h_0 的比值

图 5.2.1 受弯构件二次受力正截面承载力计算简图

5.2.2 活性粉末混凝土加固钢结构的受弯构件初始应力比折减系数 ψ 应按表 5.2.2 取值。

表 5.2.2 受弯构件初始应力比折减系数

初始应力比	ψ	初始应力比	ψ
≤ 0.2	1	0.6	0.6
0.3	0.9	0.7	0.5
0.4	0.8	≥ 0.8	0.4
0.5	0.7		

5.2.3 当 $\delta_1 h_0 < \frac{x}{\beta_1}$ 且 $\delta_2 h_0 > \frac{x}{\beta_1}$ 时,型钢腹板承受的合力对型钢

翼缘与受拉钢筋合力作用点的力矩 M_{aw} 、型钢腹板承受的合力 N_{aw} 应按下列公式计算：

$$M_{aw} = \left[0.5(\delta_1^2 + \delta_2^2) - (\delta_1 + \delta_2) + \frac{2x}{\beta_1 h_0} - \left(\frac{x}{\beta_1 h_0} \right)^2 \right] t_w h_0^2 f_a \quad (5.2.3-1)$$

$$N_{aw} = \left[\frac{2x}{\beta_1 h_0} - (\delta_1 + \delta_2) \right] t_w h_0 f_a \quad (5.2.3-2)$$

式中： β_1 ——受压区活性粉末混凝土应力图形影响系数；

f_a ——型钢抗拉强度(MPa)；

t_w ——腹板厚度(mm)。

5.2.4 当 $\delta_1 h_0 < \frac{x}{\beta_1}$ 且 $\delta_2 h_0 < \frac{x}{\beta_1}$ 时，型钢腹板承受的合力对型钢翼缘与受拉钢筋合力作用点的力矩 M_{aw} 、型钢腹板承受的合力 N_{aw} 应按下列公式计算：

$$M_{aw} = [0.5(\delta_1^2 - \delta_2^2) + (\delta_1 + \delta_2)] t_w h_0^2 f_a \quad (5.2.4-1)$$

$$N_{aw} = (\delta_1 - \delta_2) t_w h_0 f_a \quad (5.2.4-2)$$

5.2.5 活性粉末混凝土等效受压区高度 x 应满足下列公式要求：

$$x \leq \xi_b h_0 \quad (5.2.5-1)$$

$$x \geq a'_s + t'_f \quad (5.2.5-2)$$

$$\xi_b = \frac{\beta_1}{1 + \frac{f_y + f_a}{2 \times 0.003 E_s}} \quad (5.2.5-3)$$

式中： ξ_b ——相对界限受压区高度；

a'_s ——型钢翼缘合力作用点到截面受压边缘的距离(mm)；

t'_f ——受压翼缘厚度(mm)；

f_y ——钢筋抗拉强度(MPa)；

E_s ——钢筋弹性模量(MPa)。

5.3 正截面受压承载力计算

5.3.1 轴心受压构件正截面受压承载力 N 应满足下式要求：

$$N \leq 0.9\varphi(f_c A_c + f'_a A'_a + f'_y A'_s + \Delta N_{cc}) \quad (5.3.1)$$

式中： N ——轴向压力设计值(N)；

f_c, f'_y, f'_a ——活性粉末混凝土、钢筋、型钢的抗压强度设计值(MPa)；

A_c, A'_s, A'_a ——活性粉末混凝土、钢筋、型钢的截面面积(mm²)；

ΔN_{cc} ——箍筋约束作用下核心区活性粉末混凝土提高的荷载(N)；

φ ——轴心受压构件稳定系数。

5.3.2 活性粉末混凝土加固钢结构的轴心受压构件稳定系数 φ 应按表 5.3.2 取值。

表 5.3.2 活性粉末混凝土加固钢结构的轴心受压构件稳定系数

l_0/i	φ	l_0/i	φ	l_0/i	φ	l_0/i	φ
≤ 28	1.00	48	0.92	69	0.75	90	0.60
35	0.98	55	0.87	76	0.70	97	0.56
42	0.95	62	0.81	83	0.65	104	0.52

注： l_0 为构件的计算长度(mm)， i 为截面的最小回转半径(mm)。

5.3.3 箍筋约束作用下核心区活性粉末混凝土提高的荷载 ΔN_{cc} 应按下列公式计算：

$$\Delta N_{cc} = f_c \left(-0.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_1}{f_c}} - 2 \frac{f'_1}{f_c} \right) A_c \quad (5.3.3-1)$$

$$f'_1 = k_e \rho f_{yv} \quad (5.3.3-2)$$

$$k_e = \frac{A_c}{b_s h_0 (1 - \rho)} \quad (5.3.3-3)$$

$$A_c = A \left(1 - \frac{s'}{2b_s} \right) \left(1 - \frac{s'}{2d} \right) \quad (5.3.3-4)$$

$$\rho = \frac{A_{sv}}{s' b_s} \quad (5.3.3-5)$$

式中: f_c ——活性粉末混凝土轴心抗压强度设计值(MPa);

A_e ——有效约束核心区活性粉末混凝土的面积(mm^2);

f'_1 ——箍筋侧向约束应力(MPa);

k_e ——箍筋约束混凝土的有效约束效应系数;

ρ ——配箍率;

f_{yv} ——箍筋的屈服强度(MPa);

s' ——柱身约束区箍筋间距(mm);

b_s, d —— x, y 方向箍筋两肢中心线的间距(mm)。

5.3.4 偏心受压构件正截面受压承载力(图 5.3.4)应满足下列公式要求:

$$N \leq \alpha \psi' f_c b x + f'_y A'_s + f'_a A'_{af} - \sigma_s A_s - \sigma_a A_{af} + N_{aw} \quad (5.3.4-1)$$

$$N e \leq \alpha \psi' f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) + f'_a A'_{af} (h_0 - a'_a) + M_{aw} \quad (5.3.4-2)$$

$$h_0 = h - a \quad (5.3.4-3)$$

$$e = e_i + \frac{h}{2} - a \quad (5.3.4-4)$$

$$e_i = e_0 + e_a \quad (5.3.4-5)$$

$$e_0 = \frac{M}{N} \quad (5.3.4-6)$$

式中: ψ' ——偏心受压构件初始应力比折减系数;

σ_s, σ_a ——受拉或受压较小边的钢筋和型钢翼缘应力;

e ——轴力作用点至纵向受拉钢筋和型钢受拉翼缘的合力作用点之间的距离(mm);

e_i ——初始偏心距(mm);

e_0 ——轴向力对截面重心的偏心距(mm);

e_a ——附加偏心距(mm)。

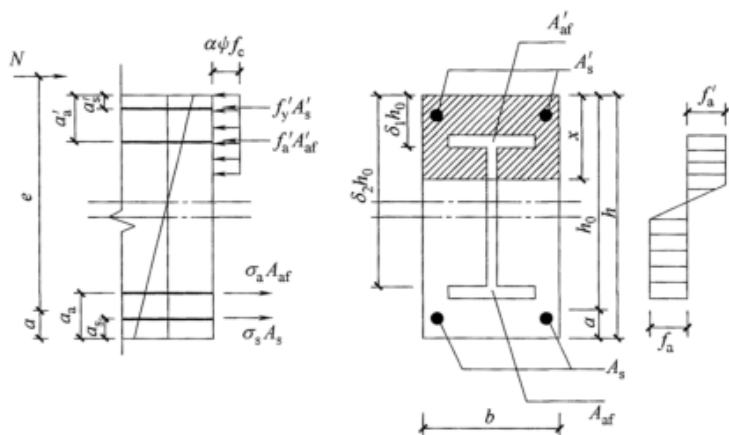


图 5.3.4 加固偏心受压柱计算简图

5.3.5 活性粉末混凝土加固钢结构的偏心受压构件初始应力比折减系数 ψ' 应按表 5.3.5 取值。

表 5.3.5 偏心受压构件初始应力比折减系数

初始应力比	ψ'	初始应力比	ψ'
≤ 0.3	1.00	0.6	0.90
0.4	0.98	0.7	0.75
0.5	0.95	≥ 0.8	0.65

5.3.6 当 $x \leq \xi_b h_0$ 时,受拉或受压较小边的钢筋应力 σ_s 和型钢翼缘应力 σ_a 应按下列公式计算:

$$\sigma_s = f_y \quad (5.3.6-1)$$

$$\sigma_a = f_a \quad (5.3.6-2)$$

5.3.7 当 $x > \xi_b h_0$ 时,受拉或受压较小边的钢筋应力 σ_s 和型钢翼缘应力 σ_a 应按下列公式计算:

$$\sigma_s = \frac{f_y}{\xi_b - \beta_1} \left(\frac{x}{h_0} - \beta_1 \right) \quad (5.3.7-1)$$

$$\sigma_a = \frac{f_a}{\xi_b - \beta_1} \left(\frac{x}{h_0} - \beta_1 \right) \quad (5.3.7-2)$$

5.3.8 相对界限受压区高度 ξ_b 应按本规程式(5.2.5-3)计算。

5.3.9 活性粉末混凝土加固偏心受压柱的正截面受压承载力计算时应计入轴向压力在偏心方向存在的附加偏心距,附加偏心距 e_a 宜取 20mm 和偏心方向截面尺寸的 1/30 中的较大值。

5.3.10 活性粉末混凝土加固双向偏心受压钢柱的承载力应满足下式要求:

$$N_d \leq \frac{1}{\frac{1}{N_{ux}} + \frac{1}{N_{uy}} - \frac{1}{N_{u0}}} \quad (5.3.10)$$

式中: N_d ——双向偏心压力设计值(N);

N_{ux} 、 N_{uy} ——柱截面 x 轴和 y 轴方向的单向偏心受压承载力设计值(N);

N_{u0} ——柱截面的轴心受压承载力设计值(N)。

5.4 斜截面受剪承载力计算

5.4.1 活性粉末混凝土加固后的钢结构构件受剪截面尺寸应满足下列公式要求:

$$V \leq 0.45\beta_c f_c b h_0 \quad (5.4.1-1)$$

$$\frac{f_s t_w h_w}{\beta_c f_c b h_0} \geq 0.10 \quad (5.4.1-2)$$

式中: V ——受剪承载力(N);

β_c ——活性粉末混凝土强度影响系数,取 0.8;

h_w ——型钢腹板高度(mm)。

5.4.2 集中荷载作用下受弯构件的斜截面受剪承载力应满足下式要求:

$$V \leq \psi'' \frac{3}{\lambda + 1} f_t b h_0 + 1.2 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + \frac{1.3}{\lambda} f_s t_w h_w \quad (5.4.2)$$

式中： ψ'' ——受剪构件初始应力比折减系数；

λ ——计算剪跨比，当 $\lambda < 1.5$ 时应取 1.5，当 $\lambda > 3$ 时应取 3；

A_{sv} ——箍筋截面面积(mm^2)；

s ——箍筋间距(mm)。

5.4.3 活性粉末混凝土加固钢结构的受剪构件初始应力比折减系数 ψ'' 应按表 5.4.3 取值。

表 5.4.3 受剪构件初始应力比折减系数

初始应力比	ψ''	初始应力比	ψ''
≤ 0.2	1	0.5	0.6
0.3	0.8	0.6	0.5
0.4	0.7	≥ 0.8	0.4

5.4.4 均布荷载作用下受弯构件的斜截面受剪承载力应满足下式要求：

$$V \leq 0.8f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.58f_{atw} h_w \quad (5.4.4)$$

5.4.5 偏心受压构件加固后的斜截面受剪承载力应满足下式要求：

$$V \leq \frac{0.58}{\lambda} f_{atw} h_w + \frac{A_{sv}}{s} f_{yv} h_0 + \frac{1.75}{1+\lambda} \psi f_t b h_0 + 0.07N \quad (5.4.5)$$

式中： N ——轴向压力设计值(kN)，当 $N > 0.3f_c A_c$ 时，取 $N = 0.3f_c A_c$ 。

5.5 裂缝宽度验算

5.5.1 采用活性粉末混凝土加固型钢梁时应验算裂缝宽度，最大裂缝宽度应根据荷载的准永久值计算，并应计入荷载长期作用的影响。

5.5.2 活性粉末混凝土加固型钢梁的最大裂缝宽度根据其计算示意图(图 5.5.2)可按下列公式计算：

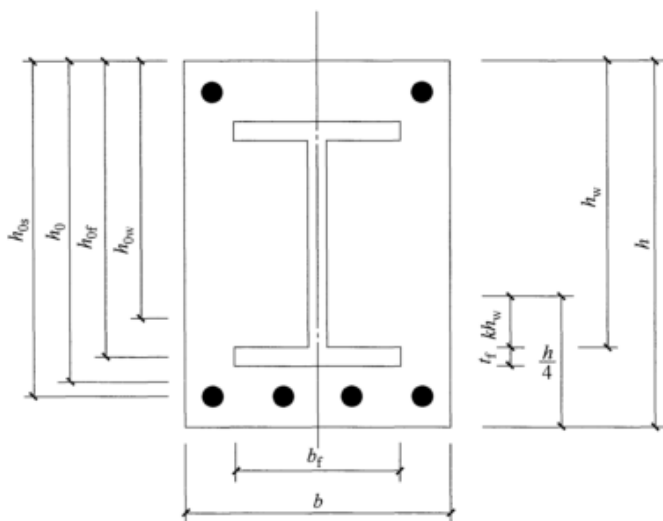


图 5.5.2 活性粉末混凝土加固型钢梁最大裂缝宽度的计算示意图

$$\omega_{\max} = 1.9\varphi' \frac{\sigma_{\text{ss}}}{E_s} \left(1.9c_s + 0.08 \frac{d_e}{\rho_{\text{te}}} \right) \quad (5.5.2-1)$$

$$\varphi' = 1.1 \left(1 - \frac{M_{\text{cr}}}{M_q} \right) \quad (5.5.2-2)$$

$$M_{\text{cr}} = 0.235bh^2 f_{\text{tk}} \quad (5.5.2-3)$$

$$\sigma_{\text{ss}} = \frac{M_q}{0.87(A_s h_{0s} + A_{\text{af}} h_{0s} + kA_{\text{aw}} h_{0w})} \quad (5.5.2-4)$$

$$k = \frac{0.25h - 0.5t_f - a_s}{h_w} \quad (5.5.2-5)$$

$$d_e = \frac{4(A_s + A_{\text{af}} + kA_{\text{aw}})}{u} \quad (5.5.2-6)$$

$$u = n\pi d_s + 0.7(2b_f + 2t_f + 2kh_{\text{aw}}) \quad (5.5.2-7)$$

$$\rho_{\text{te}} = \frac{A_s + A_{\text{af}} + kA_{\text{aw}}}{0.5bh} \quad (5.5.2-8)$$

式中： ω_{\max} ——受弯构件的最大裂缝宽度(mm)；

- φ' ——钢筋应变不均匀系数,小于 0.2 时应取 0.2,大于 1.0 时应取 1.0;
- σ_{ss} ——钢筋应力值(MPa);
- c_s ——最外层纵向钢筋的保护层厚度(mm),大于 65mm 时应取 65mm;
- d_e ——有效直径(mm);
- ρ_{te} ——计入型钢受拉翼缘、部分腹板及受拉钢筋的有效配筋率;
- M_{cr} ——梁截面抗裂弯矩(kN·m);
- M_q ——按荷载效应的准永久值计算的弯矩值(N·mm);
- A_s 、 A_{af} 、 A_{aw} ——纵向受拉钢筋、型钢受拉翼缘、钢腹板面积(mm²);
- h_{0s} 、 h_{0f} 、 h_{0w} ——纵向受拉钢筋、型钢受拉翼缘、型钢腹板重心至混凝土截面受压边缘的距离(mm);
- k ——型钢腹板影响系数;
- u ——纵向受拉钢筋和型钢受拉翼缘与部分腹板周长之和(mm);
- n ——纵向受拉钢筋数量;
- d_s ——纵向受拉钢筋的直径(mm);
- b_f 、 t_f ——受拉翼缘宽度、厚度(mm)。

5.6 受弯构件挠度计算

5.6.1 活性粉末混凝土加固受弯构件的最大挠度应按荷载效应的准永久值计算,并应计入荷载长期作用的影响。

5.6.2 加固后受弯构件的刚度可按下列公式计算:

$$B_s = \left(0.22 + 3.75 \frac{E_s}{E_c} \rho_s \right) E_c I_c + E_s I_s \quad (5.6.1-1)$$

$$B = \frac{B_s - E_s I_s}{\theta} + E_s I_s \quad (5.6.1-2)$$

$$\theta = 2 - 0.4 \frac{\rho'_{sa}}{\rho_{sa}} \quad (5.6.1-3)$$

式中： B_s ——短期刚度(N/m)；

E_a 、 E_c ——型钢、活性粉末混凝土弹性模量(MPa)；

ρ_s ——纵向受拉钢筋的配筋率；

I_c ——活性粉末混凝土截面惯性矩(mm⁴)；

I_a ——型钢截面惯性矩(mm⁴)；

B ——长期刚度(N/m)；

θ ——荷载长期作用对挠度增大的影响系数；

ρ'_{sa} ——根据截面受压区纵向受压钢筋和型钢受压翼缘面积之和计算的截面配筋率；

ρ_{sa} ——根据截面受拉区纵向受拉钢筋和型钢受拉翼缘面积之和计算的截面配筋率。

6 构 造

6.1 全截面加固

6.1.1 新增纵向钢筋与箍筋、销钉之间的连接可采用焊接或绑扎搭接;当结构承受动力疲劳荷载和地震设计状况时应采用焊接。

6.1.2 活性粉末混凝土加固构件中钢筋的最小保护层厚度不应小于纵向钢筋公称直径,且应符合表 6.1.2 的规定。

表 6.1.2 钢筋的最小保护层厚度(mm)

环境类别	保护层厚度
一	15
二 a	20
二 b	25
三	30
四	40

6.1.3 新增纵向钢筋直径不应小于 12mm,净距不宜小于 30mm 和纵向钢筋最大直径的 1.5 倍。

6.1.4 新增纵向钢筋与被加固钢构件接触部位应采用焊接方式进行连接,焊点应沿纵向钢筋长度方向布置,非抗震设计时焊点之间的距离不宜超过 300mm,抗震设计时焊点之间的距离不宜超过 200mm。

6.1.5 受压构件加固层中新增纵向钢筋的配筋率不应小于 0.55%,受弯构件和受拉构件中一侧的受拉钢筋配筋率不应小于 0.20%。

6.1.6 纵向钢筋的接头应采用焊接方式连接,同一构件上纵向钢筋的结构应错开,受拉区新增纵向钢筋的接头面积百分率不应大于 50%。

6.1.7 加固层新增纵向钢筋的布置方式和位置应满足设计文件的要求,且应符合下列规定:

- 1 H型钢和工字型钢构件的翼缘肢端应布置纵向钢筋;
- 2 槽钢和Z型钢构件的截面肢端应布置纵向钢筋;
- 3 当腹板高度大于或等于450mm时,除应按本条第1款、第2款的规定布置纵向钢筋外,尚应在腹板两侧设置纵向构造钢筋,每侧纵向构造钢筋的间距不宜大于200mm;
- 4 腹板和翼缘单侧布置的纵向钢筋不应超过两排,相邻两根纵向钢筋之间的净距不应小于30mm和纵向钢筋最大直径的1.5倍。

6.1.8 非抗震设计时加固层中箍筋直径不应小于8mm,相邻箍筋的间距不应大于250mm。

6.1.9 抗震设计时全截面加固构件端部应设置加密区,加密区的箍筋构造应符合表6.1.9的规定。非加密区的箍筋间距不宜大于加密区箍筋间距的2倍。

表 6.1.9 抗震设计时全截面加固构件加密区的箍筋构造(mm)

抗震等级	箍筋加密区长度	箍筋最大间距	箍筋最小直径
一级	2倍腹板高度	100	12
二级	1.5倍腹板高度	100	10
三级	1.5倍腹板高度	150	10
四级	1.5倍腹板高度	150	8

6.1.10 加固层中应采用封闭箍筋,箍筋末端搭接口宜设置在钢构件截面的翼缘平面上,且箍筋末端应采用点焊连接。

6.1.11 箍筋与被加固钢构件的接触部位应采用焊接方式进行连接,型钢翼缘端部和腹板宜布置焊点,同一肢箍筋上焊点之间的距离不宜超过200mm。

6.1.12 采用活性粉末混凝土进行全截面加固时,原结构构件表

面应按梅花形布置销钉。销钉宜弯折制作成 L 形,其中一边应与钢构件表面焊接,另一边应与钢构件表面垂直。

6.1.13 销钉与纵向钢筋或箍筋宜采用点焊连接固定。

6.1.14 非抗震设计时,销钉直径不应小于 8mm,销钉间距不应大于 300mm,销钉垂直钢构件表面伸入活性粉末混凝土中的长度不应小于 35mm。抗震设计时的销钉构造应符合表 6.1.14 的规定。

表 6.1.14 抗震设计时的销钉构造(mm)

抗震等级	销钉最小直径	销钉最大间距	销钉伸入活性粉末混凝土中最小长度
一级	12	150	50
二级	10	150	45
三级	10	200	40
四级	8	250	40

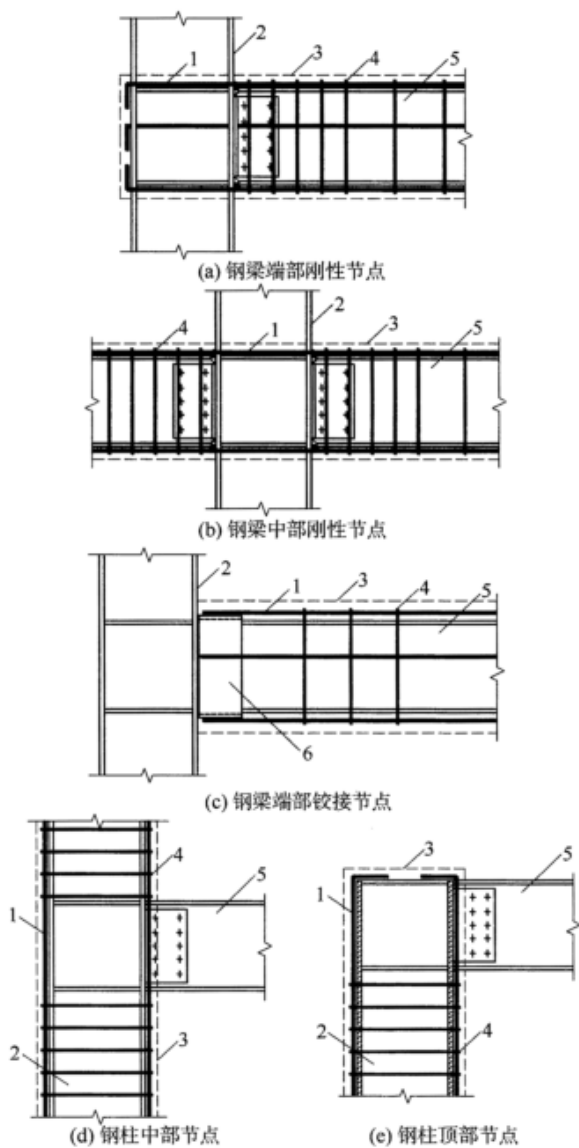
6.1.15 节点部位钢结构的连接方式应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定,节点部位纵向钢筋锚固方式应符合下列规定:

1 钢梁端部节点采用刚性连接[图 6.1.15(a)]时,钢梁翼缘的新增纵向钢筋应延伸至钢柱另一侧翼缘或腹板的另一面弯折并焊接锚固,钢柱上预留供钢筋穿入的贯穿孔形成的截面损失率不宜大于翼缘或腹板的 20%;

2 钢梁中部节点采用刚性连接[图 6.1.15(b)]时,钢梁的新增纵向钢筋应贯通穿过中部节点区钢柱,钢柱上预留供钢筋穿入的贯穿孔形成的截面损失率不宜大于翼缘或腹板的 20%;

3 钢梁端部节点为铰接[图 6.1.15(c)]时,应在梁端部翼缘和腹板外侧焊接钢板套,钢梁的新增纵向钢筋应延伸至钢柱翼缘或腹板处截断,并与钢梁端部的钢板套焊接锚固;

4 钢柱的新增纵向钢筋应贯通穿过中部节点[图 6.1.15(d)],并应在钢柱顶部弯折锚固[图 6.1.15(e)];



1—纵向钢筋；2—钢柱；3—活性粉末混凝土加固层；4—箍筋；5—钢梁；6—钢板套

图 6.1.15 节点部位纵向钢筋锚固方式示意图

- 5 锚固区的纵向钢筋与钢结构宜采用全熔透直角焊缝连接；
- 6 新增纵向钢筋的锚固长度应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

6.2 薄层加固

6.2.1 不配置箍筋时，薄层加固的活性粉末混凝土面层厚度不应小于 20mm；配置箍筋时，薄层加固的活性粉末混凝土面层厚度不应小于 25mm，钢筋的保护层厚度不应小于 15mm。

6.2.2 非抗震设计时薄层加固采用的箍筋直径宜为 8mm～10mm，箍筋间距不应大于 200mm。

6.2.3 箍筋与被加固钢构件的接触部位应采用焊接方式进行连接，型钢翼缘端部和腹板宜布置焊点，同一肢箍筋上焊点之间的距离不宜超过 200mm。

6.2.4 箍筋应根据被加固钢构件截面形状制作，无法采用单根钢筋弯折制作成独立封闭箍筋时，可采用两根钢筋分别弯折对拼成封闭箍筋，两根钢筋的拼接位置应采用焊接固定。加固层中应采用封闭箍筋，箍筋末端搭接点不宜设置在钢构件截面的翼缘肢尖。

6.2.5 抗震设计时薄层加固构件端部应设置加密区，加密区的箍筋构造应符合表 6.2.5 的规定。非加密区的箍筋间距不宜大于加密区箍筋间距的 2 倍。

表 6.2.5 抗震设计时薄层加固构件加密区的箍筋构造(mm)

抗震等级	箍筋加密区长度	箍筋最大间距	箍筋最小直径
一级	2 倍腹板高度	100	12
二级	2 倍腹板高度	100	12
三级	1.5 倍腹板高度	150	10
四级	1.5 倍腹板高度	150	10

7 施 工

7.1 一 般 规 定

7.1.1 对原构件进行开孔和焊接作业前,应采取措施减少开孔和焊接余热对结构构件内力的影响,对已经屈曲的构件不应施焊。

7.1.2 采用活性粉末混凝土加固钢结构工程的施工步骤应按下列规定进行:

- 1 加固前宜卸除荷载和设置支撑;
- 2 钢筋安装前先清理并修整原结构构件表面;
- 3 界面处理后再进行钢筋安装;
- 4 钢筋分项工程验收合格后再浇筑、喷射或抹压活性粉末混凝土;
- 5 活性粉末混凝土终凝后再进行覆膜养护或湿热养护。

7.1.3 加固施工现场环境条件应满足焊接作业要求,并应符合下列规定:

- 1 镇静钢板的焊接作业中,钢板厚度不大于 30mm 时,环境温度不应低于 -15°C ,钢板厚度大于或等于 30mm 时,环境温度不应低于 0°C ;
- 2 沸腾钢板的焊接作业中,环境温度不应低于 5°C ;
- 3 雨雪天气时应停止露天焊接作业;
- 4 风力大于 4 级时应采取防风措施,风力大于 6 级时应停止焊接作业。

7.1.4 加固施工过程中宜对结构构件的变形、裂缝进行监控,当结构构件突然发生变形增大、裂缝扩展等异常情况时应立即停止施工。

7.1.5 当需要卸除荷载时,被加固构件卸载的荷载值、位移、卸载

点位置及卸载顺序应符合施工技术方案的规定。荷载值可采用千斤顶及配套的压力表进行测读,位移可采用百分表量测。卸载过程中采用的压力表、百分表精度应优于 1.5 级。

7.1.6 设置支撑进行防护时,支撑结构应满足承载力和变形的要求。支撑结构体系应明确传力途径,且不应影响相邻结构和构件的受力条件。

7.2 界面处理

7.2.1 界面处理前应对原结构构件加固部位进行表面清理和修整,并应对钢构件的裂纹进行修复。

7.2.2 表面清理应采用砂轮机打磨或喷砂,去除锈皮、油污和氧化膜,且应切除磨光棱边与角部的咬边、毛刺。

7.2.3 采用喷砂处理钢构件表面时,喷砂机工作压力宜为 0.3MPa~0.45MPa,配备的喷砂料应采用通过 80R 筛孔但不通过 60R 筛孔的筛余料。

7.2.4 原构件表面出现裂纹时,可采用对接堵焊法、挖补嵌板法或附加盖板法进行修复。裂纹修复除应满足设计文件和技术方案要求外,尚应符合现行国家标准《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB 50550 的有关规定。

7.3 钢筋安装

7.3.1 钢筋安装前,应复查安装部位至两端以外各 50mm 范围内的清理质量。

7.3.2 钢筋安装前应按设计文件和施工技术方案的要求进行钢筋加工和标记定位,钢筋安装应按下列步骤进行:

- 1 画线定位后先焊接销钉;
- 2 当需在钢构件上预留钢筋贯穿孔时,先在钢筋贯穿部位进行开孔,再将纵向钢筋安装到设计位置后对端部进行焊接固定;
- 3 制作和安装封闭箍筋后,先连接纵向钢筋和箍筋形成钢筋

笼,并将新增钢筋与原构件各连接点进行焊接固定。

7.3.3 焊缝和焊点的焊波应均匀且无虚焊、漏焊,焊接工艺应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 的有关规定。

7.3.4 新增钢筋的数量、直径、位置以及与原构件表面间距应符合设计文件的规定。雨雪潮湿环境下宜对已安装的钢筋进行覆盖保护。

7.4 浇筑、抹压和喷射活性粉末混凝土

7.4.1 搅拌活性粉末混凝土应使用强制式搅拌机,搅拌前应将搅拌机内积水排尽。

7.4.2 使用骨料、钢纤维、水泥、矿物掺合料现场制备活性粉末混凝土时,投料顺序应符合下列规定:

- 1 第一次投料,应依次投入骨料、钢纤维并干拌 2min;
- 2 第二次投料,应投入水泥干拌 1min;
- 3 第三次投料,应投入矿物掺合料干拌 1min;
- 4 第四次投料,应投入水和外加剂搅拌 5min。

7.4.3 多组分现场制备的活性粉末混凝土原材料的计量允许偏差限值,应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的有关规定。

7.4.4 采用成品干混料、液剂现场搅拌活性粉末混凝土时,应按照产品使用说明书的要求将液剂兑水稀释后再投料搅拌,加水后的搅拌时间不应少于 5min。

7.4.5 制备和搅拌活性粉末混凝土时环境温度应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的有关规定。夏季和冬季施工宜采取隔热或保温措施,搅拌和制备过程中不应出现分层现象。

7.4.6 活性粉末混凝土施工方式应根据被加固构件和节点形式、位置、施工现场条件确定。全截面加固宜采用浇筑施工,薄层加固可采用浇筑、抹压或喷射施工。

7.4.7 浇筑活性粉末混凝土用模板的强度和刚度应符合施工方案的规定。采用分段分次浇筑施工时,支设的模板体系应具备可滑移施工装置。

7.4.8 活性粉末混凝土应保持均匀连续浇筑。当构件水平方向浇筑尺寸大于1000mm时应分段浇筑,并按单一方向依次连续施工,每段浇筑长度不宜超过500mm。当构件垂直方向浇筑尺寸大于600mm时应分层浇筑,每层浇筑厚度不宜超过300mm。相邻区段和分层之间衔接的浇筑时间不应超过2h,并保持表面湿润,不应出现层间裂缝。

7.4.9 活性粉末混凝土浇筑进入模板后,应立即用橡皮锤连续轻击模板至密实。构件模板上方宜设置漏斗口,浇筑至漏斗口并达到初凝前应及时清理漏斗口余料。

7.4.10 人工抹压活性粉末混凝土应分层分次进行,第一次抹压活性粉末混凝土时宜将加固层钢筋与原钢结构表面之间的空隙覆盖,后续每层抹压厚度不应超过10mm,抹压每层材料应在上一次抹压材料初凝后进行。

7.4.11 喷射活性粉末混凝土应使用专用的机械设备,喷嘴应具有调节喷射流量和流速的功能,主机应具备调节喷射间隔时间的功能,施工时喷嘴应固定。增压泵压力应根据喷嘴至被加固部位表面距离、流量、流速、喷射间隔时间合理调节。当喷射出料大量飞溅或呈雾状喷射时应减小压力,当喷射出料附着力过低时应增大压力。

7.4.12 正式喷射前应调试至出料均匀且无大量崩落。单次喷射出的材料,其涂布范围直径不宜超过300mm。

7.4.13 结构构件底部仰面施工宜采用喷射施工方式。第一次喷射时应均匀分散地布置喷射点,相邻喷射点之间的距离不宜小于300mm。相邻喷射部位的活性粉末混凝土初凝前应在两相邻点之间的间隔部位进行下一次喷射施工。喷射完毕后、材料初凝前应抹压平整。

7.5 养 护

7.5.1 活性粉末混凝土可采用湿热喷雾养护或覆膜养护。养护制度和养护时间应结合原材料组分、设计强度等级、现场条件确定,并应满足产品使用说明书的要求。RPC100 可采用常温养护, RPC120、RPC140、RPC160、RPC180 应采用热养护。

7.5.2 湿热喷雾养护系统宜具备调节水雾温度的装置,并应根据被加固结构构件类型和现场实际条件确定喷嘴数量。喷雾流量和喷雾释放范围应根据现场条件确定,喷雾养护时宜对相邻非加固区域构件进行防护。

7.5.3 覆膜养护宜采用透明薄膜包覆,且相邻薄膜之间搭接宽度不宜小于 200mm,包覆区域端部应密封,养护过程中应保持覆膜内壁始终留有水汽。

7.5.4 养护过程中,活性粉末混凝土表面实测温度不应低于产品使用说明书规定的养护温度,且不应低于 10℃。

8 检验和验收

8.1 一般规定

8.1.1 活性粉末混凝土加固钢结构工程的检验和验收宜包括原材料质量检验、钢筋分项工程验收、模板分项工程验收、活性粉末混凝土分项工程验收。

8.1.2 对活性粉末混凝土加固钢结构工程进行检验和验收时,除应符合本章规定外,尚应符合设计文件和现行国家标准《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344、《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB 50550 的有关规定。

8.1.3 活性粉末混凝土加固钢结构分部工程应根据加固方案工种、材料和施工工艺划分为若干个分项工程,每一分项工程宜按施工过程控制和施工质量验收的需要划分为若干个检验批。

8.1.4 检验批的质量检验方法应符合现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300 的有关规定。检验批质量应符合下列规定:

1 主控项目的质量经抽样检验均应合格;

2 一般项目的质量经抽样检验应合格;当采用计数检验时,抽检的合格率不应低于 80%,且不应有严重缺陷;

3 应具有完整的施工操作依据、质量检查记录及质量证明文件。

8.1.5 分项工程的质量验收应在所含检验批均验收合格的基础上进行,并应符合下列规定:

1 分项工程所含的各检验批质量均应符合本规程的合格质量规定;

2 分项工程所含的各检验批施工操作过程资料、质量检查记录和质量证明文件应完整。

8.1.6 检验批、分项工程和分部工程的质量验收记录可按本规程附录 A 的格式填写。施工操作过程资料宜保留影像资料。

8.2 原材料检验

I 主控项目

8.2.1 活性粉末混凝土成品干混料进场时应对应品种、强度级别、包装、出厂日期等进行检查,多组分现场制备的活性粉末混凝土尚应对各组分种类、规格、包装或散装仓号、出厂日期等进行检查。

检查数量:按同一生产厂家、同一等级、同一批号且同一次进场的活性粉末混凝土为一批,每批次数量不应大于 10t,每批见证取样不应少于一次。

检验方法:检查产品合格证、出厂检验报告和进场复验报告。

8.2.2 多组分现场制备的活性粉末混凝土在正式施工前应进行试配,并应符合下列规定:

1 试配时应采用工程现场使用的原材料组分,每盘试配料的最小搅拌量不宜小于 15L;

2 试配时如拌和物的工作性能需要调整,应在水胶比不变、胶凝材料用量和外加剂用量合理的原则下,调整胶凝材料用量和外加剂用量或不同粒径石英砂的体积分数。

检查数量:按同一生产厂家、同一等级、同一批号且同一次进场的活性粉末混凝土为一批,每批设计的试验配合比数量不宜少于 3 种。

检验方法:根据试配结果提出活性粉末混凝土强度试验采用的基准配合比,并应按现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的有关规定进行检验。

8.2.3 活性粉末混凝土中掺用的外加剂应符合现行国家标准《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119 的有关规定,且不应含有氯化物或亚硝酸盐。

检查数量:按进场的批次和产品复验抽样规定确定。

检验方法:检查产品合格证、出厂检验报告和进场复验报告。

8.2.4 加固用钢筋的品种、规格、性能等应符合设计文件的规定,钢筋原材料的力学性能应符合现行国家标准《钢筋混凝土用钢筋第2部分:热轧带肋钢筋》GB/T 1499.2的有关规定。

检查数量:按进场的批次和产品复验抽样规定确定。

检验方法:检查产品合格证、出厂检验报告和进场复验报告。

8.2.5 加固用焊接材料的品种、规格、型号和性能应符合设计文件的规定,并应符合现行国家标准《非合金钢及细晶粒钢焊条》GB/T 5117及《热强钢焊条》GB/T 5118的有关规定。

检查数量:按进场批次和产品复验抽样规定确定。

检验方法:检查产品合格证、中文标志及出厂检验报告和进场复验报告。

II 一般项目

8.2.6 拌制活性粉末混凝土的水质应符合现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63的有关规定。

检查数量:同一水源检查不应少于一次。

检验方法:检验pH值、氯化物及硫酸盐含量。

8.2.7 加固用钢筋应平直、无损伤,表面不得有裂纹、油污及锈蚀。

检查数量:全数检查。

检验方法:观察。

8.2.8 焊条应无焊芯锈蚀、药皮脱落等影响焊条质量的损伤和缺陷;焊剂的含水率应符合国家现行相关产品标准的有关规定。

检查数量:按使用量1%抽查,且不应少于10包。当使用量少于10包时,应全数检查。

检验方法:观察及测定焊条含水率。

8.3 界面处理

I 主控项目

8.3.1 清理、修整后的构件表面应平整光洁,构件表面刮痕的深

度不宜超过 1mm、长度不宜超过 30mm,构件表面缺口的深度不宜超过 1mm、宽度不宜超过 2mm。

检查数量:全数检查。

检验方法:观察及量测。

8.3.2 对原钢结构构件采用气割、机械剪切加工时,加工的允许偏差不应大于表 8.3.2 的限值规定。

检查数量:按切割面数抽查 10%,且不应少于 3 个。

检验方法:用钢尺、直角尺、斜角尺、塞尺检查。

表 8.3.2 加工的允许偏差限值(mm)

项 目	允许偏差限值
宽度、长度	3
边缘缺棱	2
割纹深度	1

II 一般项目

8.3.3 对原钢结构构件边缘进行刨削修整时,刨削量不应超过 2mm。

检查数量:全数检查。

检验方法:检查及测量。

8.3.4 修复裂纹后的构件表面应无多余焊疤、夹渣、分层、飞溅物及毛刺。

检查数量:全数检查。

检验方法:观察及放大镜检查。

8.4 钢筋分项工程

I 主控项目

8.4.1 钢筋下料和加工前应按照设计文件规定对钢筋的品种、规格进行复查。

检查数量:全数检查。

检验方法:检查出厂合格证明文件。

8.4.2 加固用纵向钢筋下料长度允许偏差应为 $\pm 5\text{mm}$ ，箍筋下料长度允许偏差应为 $\pm 3\text{mm}$ ，销钉下料长度允许偏差宜为 $\pm 3\text{mm}$ 。

检查数量：抽取 10%，且不应少于 3 个。

检验方法：钢卷尺量测。

8.4.3 钢筋的位置和间距应符合设计文件的规定，并应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的有关规定。

检查数量：每检验批抽查 10%，且不应少于 5 处。

检验方法：钢尺、游标卡尺量测。

8.4.4 设计要求全焊透的一、二级焊缝应采用超声波探伤进行内部缺陷的检验。内部缺陷分级应符合现行国家标准《焊缝无损检测 超声检测 验收等级》GB/T 29712 的有关规定。

检查数量：全数检查。

检验方法：超声波探伤。

8.4.5 焊缝外观质量应符合表 8.4.5 的规定。

检查数量：每一检验批同类构件随机抽取 10%，且不应少于 3 件。

检验方法：观察，并使用放大镜、焊缝量规和钢尺检查。

表 8.4.5 焊缝外观质量检查评定标准

应检查的外观缺陷	合格评定标准		
	一级	二级	三级
裂纹、焊瘤、弧坑、未熔合、烧穿、接头不良	不允许		
夹渣	不允许	不允许	允许有深度不大于 $0.2t$ 的夹渣
表面气孔	不允许	不允许	允许有直径不大于 2.0mm 的气孔，但每 50 个焊缝长度上不得多于 2 个
电弧擦伤	不允许	不允许	允许存在个别电弧擦伤

续表 8.4.5

应检查的外观缺陷		合格评定标准		
		一级	二级	三级
根部收缩		不允许	允许有深度不大于 $0.4t$ 的根部收缩	允许有深度不大于 $0.6t$ 的根部收缩
咬边	不修磨焊缝	不允许	允许有深度不大于 $0.5t$ 的咬边,但焊缝两侧咬边总长不得大于焊缝总长的 10%	允许有深度不大于 $1.0t$ 的咬边,长度不限
	需修磨焊缝	不允许	不允许	—

注:表中 t 为连接处较薄的板厚。

检查数量:每批同类构件随机抽查 10%,且不应少于 3 件。

检验方法:观察或使用放大镜、焊缝量规和钢尺检查。

II 一般项目

8.4.6 钢筋焊接连接点应牢固。

检查数量:每检验批抽查 10%,且不应少于 5 处。

检验方法:目测及小锤轻击。

8.4.7 钢筋焊接连接点表面不应残留焊渣和飞溅物。

检查数量:每一检验批同类构件随机抽取 10%,且不应少于 3 件。

检验方法:观察。

8.5 活性粉末混凝土分项工程

I 主控项目

8.5.1 多组分原材料现场配置活性粉末混凝土时,进场的钢纤维、外加剂、水泥等原材料应具备产品合格证明文件,各组分性能和质量应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的有关规定。

检查数量:全数检查。

检验方法:检查质量证明文件。

8.5.2 现场制备活性粉末混凝土时应制作同条件养护试件进行

抗压强度试验,试件制作应在浇筑地点随机取样,试件的力学性能试验应按现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的有关规定进行。

检查数量:每 50m^3 检验一次。批量不足 50m^3 的,按 50m^3 计算。每班次应至少检验一次,每次检验应至少留置两组试件。

检验方法:检查施工记录及试件抗压强度试验报告。

8.5.3 若同条件养护试件丢失、漏取、受损,或对试件强度试验报告有怀疑时,应现场检测和推定活性粉末混凝土的抗压强度。

检查数量:按对应现场检测方法的取样规则确定。同类型构件同时施工的作为一批次,每批次应至少检验一组。

检验方法:采用无损或微破损方法进行检测。

8.5.4 活性粉末混凝土应均匀连续浇筑,施工缝的留置和处理应按设计文件和施工方案的规定进行。

检查数量:全数检查。

检查方法:观察及检查施工记录。

8.5.5 活性粉末混凝土施工完毕后应按设计文件和产品说明书的规定进行养护。

检查数量:全数检查。

检查方法:观察及检查施工记录。

8.5.6 活性粉末混凝土拆模或终凝后,应按设计文件规定对构件的尺寸进行检查,尺寸允许偏差应符合表 8.5.6 的规定。

检查数量:全数检查。

检查方法:按现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的有关规定进行。

表 8.5.6 尺寸允许偏差(mm)

项 目	允许偏差	检验方法
截面尺寸	-5,+10	钢尺测量
加固层厚度	+5	探测仪或钻孔检查

续表 8.5.6

项 目	允许偏差	检验方法
表面平整度	+8	靠尺和塞尺检查
保护层厚度	-7,+10	探测仪或钻孔检查

8.5.7 活性粉末混凝土终凝后应对加固层与构件界面黏结质量进行检查。锤击检测判定为空鼓、结合不良的测点数不应超过总测点数的10%，且不应连续集中出现。

检查数量：每一界面按间距 300mm×300mm 的网格布置测点。

检验方法：锤击检测。

8.5.8 活性粉末混凝土施工后应按表 8.5.8 的规定进行外观缺陷检查，且不应有严重外观缺陷。对已经出现的严重缺陷进行修缮处理后，应重新检查、验收。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察、测量并检查技术处理方案和返修记录。

表 8.5.8 活性粉末混凝土外观缺陷

名称	现 象	严重缺陷	一般缺陷
露筋	构件内钢筋未被包裹而外露	发生在纵向受力钢筋中	发生在构造钢筋中，且外露不多
蜂窝	表面缺少胶凝材料导致钢筋和钢结构外露	出现在构件主要受力部位	出现在非集中受力部位，且范围小
孔洞	孔洞深度和长度均超过保护层厚度		发生在非集中受力部位，且为小孔洞
夹杂异物	夹有异物且深度超过保护层厚度		出现在非集中受力部位
内部疏松或剥离	局部不密实或剥离		发生在非集中受力部位，且范围小
裂缝	缝隙从表面延伸至内部	构件主要受力部位有影响结构性能或使用功能的裂缝	非集中受力部位出现少量不影响结构性能或使用功能的裂缝
连接部位缺陷	构件连接处有缺陷，连接钢筋、连接件、后锚固件有松动	连接部位有松动，或影响结构传力性能的缺陷	连接部位出现尚不影响结构传力性能的缺陷

II 一般项目

8.5.9 活性粉末混凝土施工后不宜有一般缺陷。若出现麻面、缺棱、掉角、棱角不直、翘曲不平等一般缺陷,应经返修后重新验收。

检查数量:全数检查。

检验方法:观察并检查技术处理方案和返修记录。

附录 A 活性粉末混凝土加固 钢结构质量验收记录

A.0.1 活性粉末混凝土加固钢结构检验批质量验收可按表 A.0.1 记录。

表 A.0.1 检验批质量验收记录

工程名称		批号及批量		验收部位		
执行标准名称及编号						
检查项目		质量验收规范的规定 (条文号)	施工单位自查评定记录			监理(建设)单位验收记录
主控项目	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
	6					
	7					
	8					
	9					
一般项目	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
施工单位检查评定结果		项目专业质量检查员			年 月 日	
监理(建设)单位验收结论		监理工程师(建设单位项目专业技术负责人)			年 月 日	

A.0.2 活性粉末混凝土加固钢结构分项工程质量验收可按表 A.0.2 记录。

表 A.0.2 分项工程质量验收记录

工程名称		结构类型		检验批数	
施工单位		项目经理		项目技术负责人	
分包单位		分包单位负责人		分包项目经理	
序号	检验批部位、区段	施工单位检查 评定结果	监理(建设)单位验收结论		
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
检查 结论	项目专业技术负责人 年 月 日		验收 结论	监理工程师 (建设单位项目专业技术负责人) 年 月 日	

A.0.3 活性粉末混凝土加固钢结构分部工程质量验收可按表 A.0.3 记录。

表 A.0.3 分部工程质量验收记录

工程名称		结构类型		层数	
施工单位		技术部门负责人		质量部门负责人	
分包单位		分包单位负责人		分包技术负责人	
序号	分项工程名称	检验批数	施工单位检查评定	验收意见	
1					
2					
3					
4					
5					
6					
质量控制资料					
安全或功能检测报告					
观感质量验收					
验收单位	分包单位		项目经理 年 月 日		
	施工单位		项目经理 年 月 日		
	勘察单位		项目负责人 年 月 日		
	设计单位		项目负责人 年 月 日		
	监理(建设)单位		总监理工程师 (建设单位项目专业负责人) 年 月 日		

用词说明

为便于在执行本规程条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

- 1 表示很严格,非这样做不可的:
正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”;
- 2 表示严格,在正常情况下均应这样做的:
正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”;
- 3 表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的:
正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;
- 4 表示有选择,在一定条件下可以这样做的,采用“可”。

引用标准名录

本规程引用下列标准。其中,注日期的,仅对该日期对应的版本适用本规程;不注日期的,其最新版适用于本规程。

- 《建筑结构荷载规范》GB 50009
- 《混凝土结构设计规范》GB 50010
- 《建筑抗震设计规范》GB 50011
- 《钢结构设计标准》GB 50017
- 《建筑抗震鉴定标准》GB 50023
- 《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119
- 《工业建筑可靠性鉴定标准》GB 50144
- 《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204
- 《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205
- 《民用建筑可靠性鉴定标准》GB 50292
- 《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300
- 《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344
- 《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB 50550
- 《钢结构现场检测技术标准》GB/T 50621
- 《碳素结构钢》GB/T 700
- 《钢筋混凝土用钢 第2部分:热轧带肋钢筋》GB/T 1499.2
- 《低合金高强度结构钢》GB/T 1591
- 《非合金钢及细晶粒钢焊条》GB/T 5117
- 《热强钢焊条》GB/T 5118
- 《建筑结构用钢板》GB/T 19879
- 《焊缝无损检测 超声检测 验收等级》GB/T 29712
- 《活性粉末混凝土》GB/T 31387
- 《混凝土用水标准》JGJ 63

中国工程建设标准化协会标准

活性粉末混凝土加固钢结构
技术规程

T/CECS 1057—2022

条文说明

制定说明

本规程制定过程中,编制组进行了活性粉末混凝土加固钢结构设计、施工、检验和验收的调查研究,总结了我国工程建设中活性粉末混凝土加固钢结构领域的实践经验。同时参考了国家现行标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的材料指标和《组合结构设计规范》JGJ 138 中加固钢结构的计算理论及主要技术内容。通过足尺加固钢构件的轴心受压试验、偏心受压试验,以及加固钢梁的受弯和受剪试验,得到活性粉末混凝土加固钢结构的设计计算方法和构造方式,总结了加固施工工艺,形成了一套完备的质量检验和验收方法。

本规程对于建筑物复杂钢结构节点和钢结构构筑物的加固计算尚需深入研究。

为便于广大技术和管理人员在使用本规程时能正确理解和执行条款规定,《活性粉末混凝土加固钢结构技术规程》编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明,对条款规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项等进行了说明。本条文说明不具备与规程正文及附录同等的法律效力,仅供使用者作为理解和把握规程规定的参考。

目 次

1	总 则	(57)
2	术语和符号	(59)
2.1	术语	(59)
3	基本规定	(60)
4	材 料	(64)
4.1	活性粉末混凝土	(64)
4.2	钢材及焊接材料	(65)
5	计 算	(67)
5.1	一般规定	(67)
5.2	正截面受弯承载力计算	(68)
5.3	正截面受压承载力计算	(69)
5.4	斜截面受剪承载力计算	(70)
5.5	裂缝宽度验算	(70)
5.6	受弯构件挠度计算	(70)
6	构 造	(72)
6.1	全截面加固	(72)
6.2	薄层加固	(73)
7	施 工	(74)
7.1	一般规定	(74)
7.2	界面处理	(75)
7.3	钢筋安装	(75)
7.4	浇筑、抹压和喷射活性粉末混凝土	(75)
7.5	养护	(77)
8	检验和验收	(79)

8.1	一般规定	(79)
8.2	原材料检验	(79)
8.3	界面处理	(80)
8.4	钢筋分项工程	(81)
8.5	活性粉末混凝土分项工程	(81)

1 总 则

1.0.1 随着科技进步和社会发展,钢结构加固工程日益增多,工程领域对超高强度、优良耐久性的钢结构加固技术的需求进一步加大。本规程采用活性粉末混凝土加固钢结构,旨在解决以下主要技术问题:一是在保证提高钢结构构件承载力的同时,能较大幅度地改善构件的弹塑性变形能力和抗震延性能力;二是更好地控制构件的裂缝开展及界面剥离或黏结滑移破坏;三是考虑活性粉末混凝土和钢材的刚度和强度匹配,确保共同工作;四是提高钢结构的防腐性能和防火性能。

1.0.2 本条给出了本规程的适用范围。目前钢结构在工业建筑与民用建筑中大量使用,包括工业厂房、异型和大跨度结构、超高层建筑等,一些基础设施和构筑物也采用钢结构建造。当这些建(构)筑物采用外包活性粉末混凝土面层进行加固时,也可适用本规程。

1.0.3 工业与民用建筑物和构筑物的钢结构进行加固前,应进行检测和鉴定。本规程所适用的加固对象是既有建筑物和构筑物的钢结构。根据现行国家标准《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344、《民用建筑可靠性鉴定标准》GB 50292 的相关规定,在对建筑结构进行改造和加固前,应对结构进行检测和检查,对重点部位提出专门的处理方案。在加固前对这些被加固的钢结构进行全面检测,以便获得结构和构件现状,查明结构布置情况、构件的截面尺寸、焊缝质量、连接和构造措施、表面缺陷情况、外观质量等信息。根据检测和调查结果,结合现行国家标准进行验算分析,才能根据加固目的有针对性地提出加固改造方案。对民用建筑和工业建筑,分别按照现行国家标准《民用建筑可靠性鉴定标准》GB

50292 和《工业建筑可靠性鉴定标准》GB 50144 的有关规定进行结构鉴定,了解结构的安全性、使用性和可靠性等级。对有抗震要求的建筑结构,还要按照现行国家标准《建筑抗震鉴定标准》GB 50023 的有关规定进行抗震鉴定,了解结构构件的抗震构造和性能。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.4、2.1.5 这两条兼顾了被加固钢结构的不同截面形式、构件类型,根据不同情况可以采用灵活的加固手段。薄层加固用于钢结构构件表面的防护,由于材料密实、耐久性优异,能起到良好的防火和防腐蚀效果。全截面加固主要用于承载能力和刚度的加固,活性粉末混凝土具有优异的性能,强度、韧性都远远高于常规的混凝土材料,较少的材料即可达到很好的加固效果。因此,对于活性粉末混凝土加固钢结构技术,基于可靠、可行和经济的原则,同等条件下可以设计较薄的加固层,以便发挥钢结构重量轻的优势,同时又能提高承载力和抗变形能力。

3 基本规定

3.0.1 全面了解工程相关情况是加固项目开始前的重要准备工作,事前调查和收集资料是其中的主要内容。了解结构或构件的类型及部位有助于全面分析被加固对象的受力特点,以及整个传力体系的稳定性。加固目的和加固范围涉及所采用的加固形式和施工工艺,在划定范围内有针对性地加固才能保证经济性。检测鉴定报告是对原结构和构件现状检测与评定的重要资料。需要注意的是,检测鉴定报告中提出的建议和参考方案内容,都只能作为参考资料,不能作为直接施工依据。任何加固行为都应有正式的加固设计文件,并按照设计文件和国家相关规范进行。

3.0.3 加固范围应根据实际情况确定,除指定的结构或构件外,尚应考虑相邻区段的结构构件和节点,并考虑结构整体工作状态。

合理确定加固范围不仅关系到加固的经济性,而且会对相邻结构和构件的受力特性产生影响。加固设计时应确认被加固构件或节点所处位置、受力特点、破坏后果及与相邻构件和节点产生的关联性。同时应考虑结构整体受力状态,加固后刚度突变可能影响整个结构的静力学和动力学特性,加固后的内力重分布也可能导致其他部位出现薄弱区域,在加固设计时应对此类情况进行充分验算和论证。

3.0.4 为了确保加固施工过程中的安全,提出本条规定。被加固结构构件往往自身即存在一定缺陷和隐患,无法满足原设计使用和承载需求,因此,在加固前要尽量卸除荷载,解除局部危险状态。因加固过程中对钢构件进行开孔、焊接或切割打磨等工序以及施工荷载变化和扰动可能对原结构构件产生不利影响,需设置安全防护和支撑措施。

3.0.6 本条规定了活性粉末混凝土加固钢结构的承载力提高幅度的要求,这是基于编制组的大量足尺构件试验和验算确定的。

本编制组制作了 36 根高度 3.0m 足尺型钢柱加固试件,分别对其进行薄层加固和全截面加固的轴心受压试验和偏心受压试验,观察受力过程及破坏形态,测得极限承载力、侧向挠度及截面应变。试验结果表明,采用活性粉末混凝土加固的型钢柱表现出极高的极限承载力,根据受力分为弹性阶段、裂缝发展阶段、破坏阶段三个阶段,从加载至破坏整个过程中各试件的内力和变形关系基本满足平截面假定。试验过程中活性粉末混凝土发挥出优异的抗拉强度与延性性能,破坏后试件残余荷载大,而裂缝发展缓慢。

H 型钢柱外包不同强度等级(RPC120、RPC140、RPC160、RPC180)的活性粉末混凝土制作的 250mm×200mm×2 940mm 试件,在轴向压力作用下,试件极限承载力达到 11 219kN~15 664kN,即提高活性粉末混凝土强度能增强箍筋对核心区的侧向约束力,极大提高构件的极限承载力(1.1 倍~1.5 倍)。型钢截面面积相同时,RPC180 试件极限承载力比 RPC140 提高了 14.96%,比 RPC120 提高了 39.62%。

利用 H 型钢柱外包不同强度等级的活性粉末混凝土制作的 250mm×350mm×2 400mm 试件进行偏心受压试验,采用 RPC120、RPC140、RPC180 三种强度等级,每种强度各两根试件。在偏心距为 90mm 的荷载作用下,极限承载力提升幅度分别达到 623%、586%、507%、523%、547%、608%。未加固构件极限承载力为 886kN,加固后达到 4 480kN~5 500kN,加固后试件承载力随型钢初始荷载的增加而降低(降低幅度平均为 10%)、随活性粉末混凝土强度增加而增加(增加幅度平均为 6%)、随偏心距增加而降低(降低幅度平均为 15%)。

编制组还进行了 36 根长 4.2m 足尺型钢梁加固试件,分别对其进行薄层加固和全截面加固的抗弯和抗剪试验,得到了试件控

制截面荷载-挠度曲线、型钢和加固钢筋与活性粉末混凝土应力沿截面高度分布曲线,各试件的极限破坏荷载、开裂荷载、屈服破坏荷载。通过分析试验结果得到了活性粉末混凝土加固梁的受弯和受剪破坏特征和规律,提出了考虑活性粉末混凝土抗拉强度的极限承载力计算公式。抗剪承载力受剪跨比改变的影响较为显著,其破坏可以分成弹性阶段、开裂阶段、屈服阶段以及极限破坏阶段,试件的裂缝发展缓慢,加固后构件抑制开裂和变形能力良好,开裂荷载可以提高 60%以上。

采用 I32a 热轧工字型钢梁外包 RPC120~RPC180 制作的 $200\text{mm}\times 400\text{mm}\times 4\,500\text{mm}$ 试件,按照初始荷载比 20%~50% 进行二次受力抗弯试验时,极限荷载达到 498.5kN~607.7kN,远高于未加固试件(290.1kN)。

采用 I32a 热轧工字型钢梁外包 RPC120~RPC180 制作的 $200\text{mm}\times 400\text{mm}\times 4\,500\text{mm}$ 试件,按照初始荷载比 20%~40% 进行伸臂梁二次受力抗剪试验(剪跨比 1.4 和 1.8)时,极限荷载达到 2 135kN~2 681kN,比未加固试件(937kN)提升明显。

编制组还进行了 54 组带栓钉活性粉末混凝土加固型钢试件的推出试验,研究试件界面剪力传递性能。带栓钉连接件破坏形态均表现为活性粉末混凝土的劈裂破坏,当达到极限承载力时,试件因栓钉剪断而失效,和普通混凝土相比,侧面裂缝并没有贯通试件的长度方向,说明韧性和延性优良。配箍率对试件的极限承载力的影响效果不明显,但是对后期残余承载力和变形的影响较为显著。和无栓钉的试件对比,在界面加入栓钉这一类剪力连接件对极限承载力提高效果明显。

3.0.7 本条规定了采用活性粉末混凝土加固后的钢结构设计使用年限。除被加固结构构件外,加固工程中其余构件通常在未进行加固前已服役一段时间,即这些未加固构件已在所处环境中负载一段时间,因此考虑加固后设计使用年限时,不应超过原结构设计使用年限,从而确保所有构件不超期服役,避免其他未加固构件

出现破坏,产生不良后果。

3.0.8 由于加固层活性粉末混凝土具有优良的耐久性,能对钢结构起到很好的防护作用。因此本条规定了采用活性粉末混凝土加固的钢结构的建议检查周期,首次检查和后续每次检查的时间间隔与现行国家标准《钢结构加固设计标准》GB 51367 的有关规定一致。每次检查后若发现缺陷或其他异常情况,需经技术分析和鉴定后再采取措施,以维持良好工作状态。

4 材 料

4.1 活性粉末混凝土

4.1.1 本条参考现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387的有关规定,对活性粉末混凝土原材料做了相关规定,适用于采用多组分现场配置的活性粉末混凝土原材料。目前市面上已推广使用成品出厂的干混料,无须在施工现场对每一组分进行计量和检验,便于现场施工。但干混料产品的出厂检验中相关组分的技术标准仍需满足本条要求。

4.1.2 石英砂和石英粉是活性粉末混凝土的重要组分,其粒级和粒径对强度影响显著,氯离子、硫化物等物质对材料性能不利。

4.1.3 活性粉末混凝土应该选用效果优良的减水剂,从而控制单位用水量,利于提高强度,同时易于搅拌均匀。

4.1.4 高强度微细钢纤维是活性粉末混凝土的重要组分,钢纤维强度、长度、直径对活性粉末混凝土材料强度的发挥有重要影响。纤维长度过长、直径过细不利于搅拌和施工;纤维长度过短对韧性和抗拉强度不利。

4.1.5 水胶比、胶凝材料用量和钢纤维掺量对活性粉末混凝土强度影响显著,因此本条规定了这三个指标的限值范围。根据不同厂家的配方和生产条件,各类活性粉末混凝土产品的配制参数不尽相同,而优化水胶比、在一定范围内提高胶凝材料用量和钢纤维掺量,是提高材料强度的主要途径。

活性粉末混凝土材料的配制、生产、搅拌、运输、浇筑、养护和检验等,直接关系到材料强度和性能。目前广泛推广使用强度等级为 100MPa~180MPa 的活性粉末混凝土材料,在材料各组分中,钢纤维掺量对强度和搅拌和易性的影响很大。已有的研究成

果表明,活性粉末混凝土中钢纤维的最佳体积掺量为2%~4%。

4.1.6 活性粉末混凝土立方体抗压强度标准值是指按标准方法制作、养护的边长为100mm立方体试件,在28d或设计规定龄期以标准试验方法测得的具有95%保证率的抗压强度标准值,是活性粉末混凝土各项力学性能指标的基本代表值。本条采用边长100mm的立方体试件作为标准试件,按立方体抗压强度标准值确定活性粉末混凝土的强度等级,与现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387的有关规定一致。活性粉末混凝土立方体抗压强度的尺寸效应不明显,这主要是由于材料密实、无粗骨料影响,颗粒物、微裂缝和孔隙缺陷导致的立方体试件强度损失较小。

活性粉末混凝土受压和受拉弹性模量基于国内外相关试验结果统计回归得出,可以采用与普通混凝土类似的形式表达。已有的研究表明,活性粉末混凝土的弹性模量受钢纤维掺量影响很小,表达式中可忽略钢纤维掺量的影响,仅根据强度等级按一定公式进行计算得到。

4.1.7 活性粉末混凝土轴心抗压强度按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010中关于混凝土轴心抗压强度的计算方法确定。

4.1.8 普通混凝土在设计时不考虑抗拉强度的贡献,而活性粉末混凝土材料中钢纤维的掺入使得材料抗拉强度高于普通混凝土抗拉强度。加固设计时对抗拉强度的利用率有限,为了保证足够的安全储备,本规程将活性粉末混凝土出现开裂即视为抗拉强度失去作用,而非极限抗拉强度。

4.2 钢材及焊接材料

4.2.1 本条提出了加固用钢筋的材料性能要求,其与混凝土结构加固工程用钢筋的基本性能要求一致。

4.2.2 加固用钢材主要用于原钢结构构件的修整、嵌补、节点区锚固等,加固用钢材应与原钢结构构件的强度等级和焊接性能相

匹配。

4.2.3 焊接是活性粉末混凝土加固钢结构技术中的主要连接方式,大量用于新增钢筋与原构件的连接、新增钢筋之间的连接、新增钢筋的锚固等。

4.2.4 销钉是传递界面剪应力确保加固层与原结构共同工作的重要构造措施,因此必须确保销钉的质量。

5 计 算

5.1 一 般 规 定

5.1.1 常用的加固截面形式分为全截面加固和薄层加固。全截面加固用于解决承载力和变形的加固问题,加固时应根据原钢结构构件的截面类型合理布置纵向钢筋,既要便于施工,又要能形成稳固钢筋笼,使加固层与原钢结构共同工作。薄层加固主要解决防护性能的加固问题,适用于提高不同截面类型构件的防火性能、防腐性能,且不显著增加自重,经济性较好。

5.1.2 本条提出了活性粉末混凝土加固钢结构正截面承载力的基本假定。

1 活性粉末混凝土构件正截面承载力计算时仍采用平截面假定。编制组对活性粉末混凝土梁受力全过程截面的应变分布进行了测试,结果表明在纵向受拉钢筋的应力达到屈服强度之前及达到屈服强度后的一定塑性范围内,截面的平均应变基本符合平截面假定。国际上关于配筋活性粉末混凝土构件的分析方法及规范也均采用平截面假定。

2 由于钢纤维的掺入,活性粉末混凝土抗拉强度高于普通高强混凝土,但对极限承载力的贡献依然较小,因此正截面承载力计算时不计入受拉区活性粉末混凝土抗拉强度。

5 活性粉末混凝土结构正截面承载力计算时采用等效矩形应力图块代替实际的应力分布。本条对受弯构件、偏心受力构件正截面承载力计算时等效矩形应力图块的转化系数做出了规定。根据已有研究中活性粉末混凝土的本构关系,参考现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定,计算活性粉末混凝土的转化系数 α_1 及 β_1 。

5.1.3 本条提出了采用活性粉末混凝土加固钢结构的验算和设计原则。

结构上的作用,除了按现行国家标准采用外,还要考虑加固后的实际使用功能需求,如增加设备等。作用效应和组合是在考虑结构构件加固后实际的荷载偏心、温度作用、沉降等附加内力条件下,结合现行规范选取的。构件的截面尺寸按实测值选取,但钢结构构件检测值存在允许偏差,因此应当选取现场检测的最小值或平均值,并在加固设计文件中给出取值依据的说明。原构件的材料强度需通过现场检测推定钢材的强度值,不能笼统地采用原设计资料提供的强度值。加固验算和设计时应当考虑二次受力条件下应力滞后问题,新增加固层投入工作状态时,原结构已处于受力状态,即使经过卸载后仍可能处于 20% 甚至 50% 的负载状态,同时新增加固层导致的自重增加和偏心距的变化也要在设计时加以考虑。考虑抗震设防要求时,由于加固后的结构构件自重和刚度的增加,可能导致局部加强和刚度突变,从而在邻近构件和节点处出现薄弱部位,在验算时也需考虑。

5.1.4 本条提出了持久和短暂设计状况下的承载力设计原则,构件的重要性系数与现行行业标准《组合结构设计规范》JGJ 138 的有关规定一致。

5.1.5、5.1.6 这两条提出了地震设计状况下的承载力设计原则,承载力抗震调整系数的取值参考了现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定。

5.2 正截面受弯承载力计算

5.2.1~5.2.4 正截面受弯承载力计算公式参考了现行行业标准《组合结构设计规范》JGJ 138 的计算方法,并根据相关单位的足尺构件二次受力试验结果,引入受弯构件初始应力比的折减系数。

5.2.5 活性粉末混凝土受弯构件的破坏特征与普通混凝土构件

基本相同,构件截面的界限破坏也为受拉侧型钢和受拉钢筋屈服与受压区活性粉末混凝土压碎同时发生的破坏状态。根据平截面假定,可得出截面相对受压区高度的计算方法。

5.3 正截面受压承载力计算

5.3.1 考虑活性粉末混凝土、钢筋、型钢的强度贡献,轴心受压承载力由截面内的活性粉末混凝土、纵向钢筋、型钢共同承担。根据编制组的试验验证结果,式(5.3.1)中计入了箍筋约束作用下核心区活性粉末混凝土提高的荷载的影响。

5.3.3 本条给出了箍筋约束作用下核心区活性粉末混凝土额外承担荷载的计算方法,这是依据国内外研究理论给出的优化解。采用国际上研究钢筋混凝土柱在三向应力作用下有效约束核心区混凝土抗压强度提高幅度计算的研究成果,经过简化计算得到箍筋约束作用下核心区活性粉末混凝土强度的提高量所导致柱额外承担的荷载。该方法主要是基于矩形截面箍筋对核心区的侧向约束,此外箍筋间距、截面形式和箍筋强度对侧向约束效果有显著影响。

5.3.4 本条提出了活性粉末混凝土加固偏心受压构件正截面承载力的计算公式,它是在平截面假定基础上,采用极限平衡方法,并将型钢腹板应力图形简化为拉压矩形应力图块得到的。

5.3.5 对于受压条件下,加固前和钢构件初始应力有关的折减系数与受弯构件有一定差别,由于钢柱等受压构件通常初始荷载水平较高,因此列举了偏心受压构件从0.3~0.8的初始应力比折减系数。

5.3.9 附加偏心距的确定方法与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010中的有关规定相同。

5.3.10 对截面具有两个相互垂直对称轴的双向偏心受压构件进行正截面承载力计算时,首先要符合单向偏心受压承载力规定,在此基础上再进行双向偏心受压承载力的计算。

5.4 斜截面受剪承载力计算

5.4.1 为了控制活性粉末混凝土加固钢结构受弯构件的破坏形态,本条通过斜压破坏的截面控制条件,给出了加固受弯构件抗剪承载力上限值。

5.4.2~5.4.5 这四条参考了现行行业标准《组合结构设计规范》JGJ 138 的计算方法,提出了活性粉末混凝土加固受弯构件和偏心受压构件的受剪承载力计算公式。计算中分别考虑型钢、加固箍筋和活性粉末混凝土的作用,同时在试验研究的基础上提出了受剪构件初始应力比折减系数。

5.5 裂缝宽度验算

5.5.1、5.5.2 目前一些研究中采用在普通型钢混凝土结构裂缝验算公式的基础上引入钢纤维影响系数和钢纤维含量特征值来验算裂缝宽度。钢纤维含量特征值根据活性粉末混凝土中钢纤维体积率,即钢纤维长度、直径或等效直径来计算。采用成品活性粉末混凝土材料时,该指标可根据生产厂家提供的产品证明文件获取。在本规程中,全截面加固承载力计算公式中不计入钢纤维对活性粉末混凝土抗拉强度的影响,活性粉末混凝土出现裂缝即视为抗拉强度失去作用,且加固薄层开裂后防护效果也退化,因此在裂缝宽度验算时也不计入钢纤维的抗拉作用和桥接作用。

5.6 受弯构件挠度计算

5.6.1 采用活性粉末混凝土加固的受弯钢结构构件在正常使用极限状态下的挠度为原构件在实际静荷载作用下产生的挠度与构件加固后在新增荷载作用下产生的挠度之和。

在等截面构件中,可假定各同号弯矩区段内的刚度相等,并取用该区段内最大弯矩处的刚度。当计算跨度内的支座截面刚度不

大于跨中截面刚度的 2 倍或不小于跨中截面刚度的 $1/2$ 时,该跨也可按等刚度构件进行计算,构件刚度可取跨中最大弯矩截面的刚度。

6 构 造

6.1 全截面加固

6.1.1 在地震作用和动力荷载作用下,焊接方式更加可靠。

6.1.2 本条参考现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010,规定了活性粉末混凝土加固构件中钢筋的最小保护层厚度。由于活性粉末混凝土密实程度高,具备良好的自密实性,对钢筋和钢结构的防护效果很好。相比于普通混凝土,在实际使用过程中防护作用更强。

6.1.3 新增纵向钢筋的净距太小不易抹压或浇筑活性粉末混凝土面层,容易产生空鼓点。故本条对新增纵向钢筋的最小净距进行了规定。

6.1.4 焊点之间的距离超过 300mm 时,纵向钢筋与原钢结构构件表面难以有效贴合,导致保护层厚度难以控制;而焊接部位焊点间距小于 300mm 对两者共同工作更加有效。

6.1.5 本条规定了构件中的最小配筋率,其与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定一致。

6.1.6 本条规定了加固新增纵向受拉钢筋的接头面积百分率不应大于 50%,以防止极端情况下出现接头处全截面钢筋破坏。

6.1.7 本条规定了加固层新增纵向钢筋的布置方式和位置,根据不同加固方式和条件,结合钢结构构件截面形式、加固方法确定。

6.1.8~6.1.11 这四条规定了箍筋的构造要求,包括箍筋的形式、箍筋的直径与间距要求以及与被加固钢构件的接触部位的连接方式。焊接能确保箍筋位置准确固定。对于薄层加固,箍筋需要弯折成各种形状,此时在钢构件截面的每个外凸阳角及内凹阴角部位布置焊点,能更加有效地固定箍筋位置。薄层加固和全截

面加固时,新增箍筋都应采用封闭箍筋。构造中将箍筋末端制作成弯钩和封闭焊接形式,确保箍筋对构件核心区的约束作用,同时充分发挥钢筋笼骨架作用,提高承载能力和活性粉末混凝土层抗剥离效果。

6.1.12~6.1.14 销钉是活性粉末混凝土加固层和原结构构件界面传力的最重要方式,也是防止界面黏结滑移和剥离破坏的重要手段,因此这三条对销钉的构造措施进行了规定。在抗震设防区加密销钉,能进一步发挥加密区箍筋的效果,提高抗震延性。

6.1.15 为了确保活性粉末混凝土加固钢结构技术可靠,在满足承载力和变形设计验算前提下,本条规定了节点部位纵向钢筋的锚固方式。纵向钢筋伸出原构件端部后应穿过或绕过节点部位的连接面(翼缘、腹板或缀板),并通过弯折和焊接与相邻构件可靠锚固。节点部位连接面两侧区域的纵向钢筋与钢构件双面焊接,并进行箍筋加密,再将节点锚固区采用活性粉末混凝土包覆,以达到加强节点的目的。

6.2 薄层加固

6.2.1~6.2.5 薄层加固中箍筋、节点的构造方式与全截面加固类似,但薄层加固主要作为防护构造加固,不涉及承载力和刚度的加强,因此加固层厚度也较薄。焊接固定后,箍筋能同时起到约束和传递界面应力的作用。与全截面加固类似,对抗震区的箍筋直径、间距、加密区长度的要求均更严格。

7 施 工

7.1 一 般 规 定

7.1.1 活性粉末混凝土加固钢结构施工过程中,因原构件表面处理和安装钢筋等工艺需要,在钢构件表面进行切割、点焊或开孔等操作时,会对结构局部造成削弱和扰动。因此本条提出相应的安全措施要求。

7.1.2 本条规定了加固施工的步骤程序,其中活性粉末混凝土施工可采用浇筑、喷射或抹压工艺。

浇筑施工是常规工艺,对于竖向浇筑和全截面浇筑,若支模方便可采用此方案。活性粉末混凝土具有良好的自密实度和流动性,浇筑后可顺利成型。

喷射施工是运用高压喷射设备,将连续或非连续的活性粉末混凝土喷射至构件表面,形成一定直径的饼状浆料附着在喷射点。适用于薄层加固和复杂不易装模的情形。

抹压施工适用于叠合层表面浇筑,摊平浇筑料后采用人工抹压至设计厚度。但单次抹压厚度不能过大,施工不便时叠合层仍采用浇筑施工。

7.1.3 安装钢筋过程中采用的焊接作业对环境条件有一定要求,因此本条做出了相应规定。

7.1.4 对结构变形影响较大的加固工程宜进行监控。加固施工过程中的实时监控主要包括原构件应力、加固层应力、构件变形、支撑结构应力和变形等,施工前应制订相应的监控方案和应急预案。

7.1.5 本条规定了卸除荷载的措施规定。卸除荷载时应制订专门的技术方案,确定卸载的数量和顺序,同时需考虑相邻结构构件

应力的变化。卸载时采用检定合格的仪器才能确保量值准确。

7.2 界面处理

7.2.1 原钢结构构件表面裂纹的修复,可参照现行国家标准《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB 50550 和《钢结构加固设计标准》GB 51367 的有关规定进行。

7.2.2、7.2.3 表面清理的原则是清除钢材表面的锈迹、油污等隔离层,使其露出金属光泽。为了达到要求,这两条给出了通过砂轮机打磨和喷砂等方式进行糙化处理的规定。砂轮机打磨应均匀双向往返打磨,防止单向重复打磨造成过深压痕。

7.2.4 钢结构构件修复时采用的“焊”和“补”措施都应满足相关标准和设计对焊接工艺的要求,同时应注意焊接热影响区残余应力导致的钢材性能退化的问题。

7.3 钢筋安装

7.3.1~7.3.4 安装钢筋的步骤是:首先将销钉焊接以固定纵向钢筋位置;安装纵向钢筋时,先在端部焊接固定,再将箍筋与之绑扎或焊接,形成钢筋笼,最后将钢筋笼与钢构件固定。复杂截面加固用新增钢筋需按构件截面现场制作,以保证钢筋与活性混凝土的连接和裹握能力。为了防止已安装的钢筋和已完成界面处理的钢结构构件表面产生新的锈蚀、污损,安装检查完成后要及时覆盖保护,以防雨淋和湿雾影响。

7.4 浇筑、抹压和喷射活性粉末混凝土

7.4.1 使用强制式搅拌机才能使活性粉末混凝土中掺有的钢纤维混合料搅拌均匀,特别是在采用长丝纤维和掺水量较少的情况下。搅拌不到位易导致混合料成团结块,影响出料的性能和强度。

7.4.2 本条制定了现场配制各组分活性粉末混凝土混合料的投料顺序,参考了现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 中

的工艺方案。本规程编制组经过适配调整,简化了流程,便于施工现场实施。虽然原料各组分掺量可通过准确计量确定,但在施工现场搅拌时,精确的时间和合理的顺序仍然是关键。如果搅拌不充分,易成团结块,而搅拌时间过长又会影响原料性能。本条提出的工艺步骤能适应市场上产品的主要需求。对于有特种使用要求或采用特殊原料配制的产品,尚应结合实际工程和厂商的建议。

7.4.3 为了确保计量精准,确保配制的活性粉末混凝土性能,本条对计量允许偏差做了相应规定。

7.4.4 成品干混料是市面上活性粉末混凝土供货的主要类型,仅需要采用出厂的成品干混料加水即可开始现场搅拌,计量和配合比在出厂前完成,确保了质量的稳定性,且施工便捷。液剂通常用来加强和易性或调节凝结时间,是由厂家根据工程需要提供的一种辅助手段。本条规定成品干混料加水后的搅拌时间不应少于5min,是基于现有研究中大量试验配置得出的,一些厂家也采用这一规定作为出厂建议。

7.4.5 炎热夏季大量水分蒸发和冬季低温影响都能导致活性粉末混凝土性能异常,本条规定参考现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387对夏季高温施工和冬季低温施工做了相关规定。普通混凝土施工中覆盖薄膜等措施,在活性粉末混凝土施工时同样适用。

7.4.6 活性粉末混凝土重度较大,具备良好的自密实性,材料搅拌后呈黏流状。施工时可根据现场实际情况选择成型方式。

7.4.7 与普通混凝土相比,浇筑活性粉末混凝土的模板体系对平整性和强度的要求更高。随着铝模和装配式体系的大量运用,分段滑移浇筑施工技术已相当成熟,将之用于活性粉末混凝土的分段浇筑可解决装模和拆模的问题,提高施工效率。同时,铝模等金属材料模板安装导热装置后能调节养护温度,解决现场高温养护问题。

7.4.8 控制分段和分层施工的最大尺寸是为了防止一次浇筑体

量过大。当梁柱类构件单次浇筑施工节段长度大于 500mm 时,不利于材料敲击振动密实。竖向构件单次浇筑层厚度大于 300mm 时,容易在内部产生施工裂缝。相邻两次浇筑时间大于 2h 时,活性粉末混凝土已开始初凝,影响新旧浇筑料的均匀性。

7.4.9 活性粉末混凝土自密实度良好,采用橡皮锤敲击模板可使填充密实。模板上方设漏斗,是为了保证最后一次浇筑密度,使构件顶部无裂缝孔隙产生。

7.4.10 人工抹压活性粉末混凝土的方式与抹压复合砂浆类似。第一次抹压是确保材料与原结构构件附着结合,后续分层抹压厚度不超过 10mm 主要是考虑活性粉末混凝土重度大,若其厚度过大难以施工刮平。每层材料初凝后再施工第二层,以保证已初凝材料不致扰动。

7.4.11 编制组通过大量试验,掌握了机械喷射施工活性粉末混凝土材料的特性,并提出了喷射施工方法。喷射设备主要由料仓、输送通道、喷射枪等部分组成。料仓接收已搅拌好的浆料并持续搅拌,输送通道将浆料压出,形成喷射力,喷射枪调整出料状态。

7.4.12 本条规定的喷射出料涂布范围是基于已有试验研究和机械性能确定的。喷射范围过大,需要很大的压力,会造成材料飞溅和浪费;喷射范围过小,达不到附着力,在竖向喷射面施工时难以成型。

7.4.13 本条提出“跳仓式”间隔喷射,可以防止大量喷射浆料成团导致掉落,且间隔喷射能使前期喷射点的浆料初凝,后期在空格区域喷射时不至于产生扰动。在材料终凝前及时抹压能保证平整和成型质量,防止产生孔隙和麻面等表面缺陷。

7.5 养 护

7.5.1 施工现场养护制度与工厂配制存在很大差异。已有的研究大多在恒温恒湿条件下,以及特定容器的蒸压条件下进行。编制组按现场施工条件进行了试验,提出了湿热喷雾养护和覆膜养

护方式。产品生产厂家根据生产要求,通常会给出建议的养护温度和时间。在现场施工时,相关单位应保证所采取的养护条件达到产品要求。

7.5.2 湿热喷雾养护是在构件外侧安装喷淋装置,将加热到设定温度的水引入喷淋装置,调节喷嘴产生一定温度的水雾,使构件处于恒温恒湿环境。喷淋装置的管道可移动,管道和喷嘴拆装便捷,可安装在支模架上或体外搭建支架。但需要注意的是,喷雾时需避开相邻钢结构,防止长时间受潮导致锈蚀缺陷。

7.5.3 覆膜养护适用于夏季高温易大量失水的情形。本条规定了覆膜搭接最小宽度,能确保包覆严密。必要时,可在膜内放置输水细管,在覆膜保温同时定期淋水。

7.5.4 本条规定了养护温度的要求,现场可采用红外测温仪或其他非接触式仪器实时测量。低于 10°C 时,保温措施可参考混凝土冬季施工的保温要求进行。

8 检验和验收

8.1 一般规定

8.1.1 根据施工步骤,本条将活性粉末混凝土加固钢结构的检验和验收程序分为四个分项工程,每个分项工程按相应的标准验收。

8.1.2 加固工程通常属于量小但面广的工程,检验批的划分难以将同一批材料囊括其中,可按施工批次分别划分。

8.1.3 现行国家标准《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344 以及《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB 50550 中提出的检测数量和检测方法,对本规程加固工程的施工质量检验和验收同样适用。

8.1.4 本条规定了检验批质量的抽样原则和合格质量标准。主控项目涉及质量和安全,必须全部合格,一般项目的合格点率不低于 80% 才能保证质量。此外,施工保证体系资料应完整可溯源。

8.1.5 分项工程的质量验收是以检验批为基础的,因此应合理划分检验批,使其既准确反映质量真实情况,又具有代表性。

8.1.6 本条参考现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300 的有关规定,给出了活性粉末混凝土加固钢结构工程施工质量检验的格式。

8.2 原材料检验

I 主控项目

8.2.1 对于多组分现场配制的活性粉末混凝土,只有在进场前对每一组分按批次抽检,才能保证每一组分的质量合格。因此,本条对其做了规定。

8.2.2 多组分现场配制的活性粉末混凝土在正式施工前应进行试配,每盘试配料少于 15L 时难以准确反映材料性能,易造成过大误差;而调整配合比则应在保证水胶比不变的条件下,快速调整到最佳的胶凝材料量和石英砂体积分数。

为了便于绘制配合比曲线,本条规定同一批试件每项设计不少于三种配合比,适配方法可按现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的有关规定执行。

8.2.3 外加剂的掺入要严格控制质量和技术指标,特别是氯化物、亚硝酸盐、硫化物等,否则将严重影响材料性能。

8.2.4 本条对加固用钢筋性能检验和验收做了规定,主要参考普通钢筋混凝土中钢材性能指标的要求。

II 一般项目

8.2.6 对满足工程用水标准的洁净水,主要检验水中有害元素,包括氯和硫化物等。除非材料出厂文件明确规定需要使用纯净蒸馏水或需要精确计量现场配制活性粉末混凝土材料,其他情况下,工程现场可使用普通洁净自来水进行原材料配制、搅拌施工和养护。

8.2.7 使用过的钢筋和钢材,材质和性能退化,且截面可能由于环境和使用因素出现影响受力性能的缺陷,因此不能使用弯曲或调直的钢筋和再生钢材。

8.2.8 本条规定了焊条抽检的数量。因含水率是焊材质量的重要指标,故其限值应满足相关产品标准的要求。

8.3 界面处理

I 主控项目

8.3.1 修整和除锈过程中,过大的划痕将影响构件截面性能,因此本条规定了划痕深度的最大值。

8.3.2 精确切割和剪切能防止削弱截面影响受力性能,因此本条规定了边缘加工的允许尺寸偏差要求。

II 一般项目

8.3.3 本条对刨削修整程度做了规定,这是为了防止刨削过度导致截面削减而降低截面受力性能。

8.3.4 表面修整和裂纹修复应加工至表面光洁平整,采用观察及放大镜检查的方式即可达到检查目的。

8.4 钢筋分项工程

I 主控项目

8.4.1、8.4.2 钢筋下料和加工应保证长度精确,这两条对纵向钢筋、箍筋网的允许偏差做了规定,除了保证满足设计要求外,主要是为了保证施工空间的锚固和连接可靠。

8.4.3 本条规定了钢筋位置和间距的要求,这是为了确保活性粉末混凝土能填满钢筋网与钢材表面空隙。

8.4.4、8.4.5 焊缝外观质量的检查评定参照现行国家标准《钢结构现场检测技术标准》GB/T 50621 的有关规定进行。采用活性粉末混凝土加固钢结构时,焊缝主要位于受力钢筋与钢材连接点,焊缝质量是影响两者协同受力的关键。为了确保加固层与原结构有效共同工作,本条对焊缝质量做了相应要求。

II 一般项目

8.4.6 钢筋连接质量的检查采用简便易于操作的方式,如摇动或锤击无空隙表明牢固性良好。

8.4.7 焊接完成后飞溅物的焊渣可能对相邻构件表面造成烫伤或损害保护层,同时还会给人员安全和防火安全带来隐患。结构构件表面残存的焊渣若不清理,会在外包的活性粉末混凝土层中形成缺陷点,因此本条提出了清理焊渣和飞溅物的规定。

8.5 活性粉末混凝土分项工程

I 主控项目

8.5.1 多组分配制活性粉末混凝土的原材料进场时,需要对随货

的产品合格证明文件(包括出厂合格证、检测报告)进行核查检验。由于配制活性粉末混凝土的材料的力学性能通常在达到龄期后才能进行测试,此时若发现存在缺陷已无法溯源,因此,本条规定了进场前的原材料检查,必要时由第三方机构随机抽检进行原材料检测。

8.5.2 每次检验留置两组试件可防止试块缺失或损坏导致无法检验评定的情况。

8.5.3 当试块不慎丢失、漏取或受损,此时只能通过现场检验的方法来检测实体强度。

8.5.4 非连续浇筑时,若处置不当易造成接缝处活性粉末混凝土剥离开裂。